

Grundlagen der Trennung von festen Rohstoffen im quasielektrostatischen Feld eines Walzenabscheiders

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs

im Fachbereich

Maschinenwesen

Energietechnik - Maschinentechnik - Verfahrenstechnik
der Universität Essen

von

Dipl.-Ing. Hermann Bergmann

aus

Gelsenkirchen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Willi Wagener

Prof. Dr.-Ing. Erich Sauer

Tag der mündlichen Prüfung:

24.06.2003

Inhaltsübersicht

1 Formelzeichen	-1-
2 Einleitung	-4-
2.1 Grundprinzipien der Elektrosortierung	-6-
2.2 Schrifttumsübersicht	-11-
2.3 Problemstellung für die eigenen Untersuchungen	-17-
3 Wesentliche Einflussgrößen	-18-
3.1 Zielgröße	-19-
3.2 Konstruktive Einflussgrößen	-19-
3.3 Stoffliche Einflussgrößen	-19-
3.4 Betriebliche Einflussgrößen	-19-
3.5 Konstanten	-20-
3.6 Relevanzliste	-20-
4 Untersuchung der elektromechanischen Einflussgrößen	-22-
4.1 Theoretische Betrachtungen	-22-
4.1.1 Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Kornbahnkurven	-22-
4.1.2 Berechnung der Feldkräfte	-24-
4.1.3 Eigener Ansatz zur Berechnung der elektrischen Kornladung	-28-
4.1.3.1 Berechnung der Ladung als Funktion der Zeit	-29-
4.1.3.2 Bestimmung der Durchschlagfeldstärke	-30-
4.1.4 Numerische Lösung des Problems der Kornbewegung	-32-
4.2 Experimentelle Untersuchungen	-33-
4.2.1 Versuchsanlage	-33-
4.2.1.1 Walzenscheider	-35-
4.2.1.2 Hochspannungsanlage	-36-
4.2.1.3 Klimakammer und Klimaanlage	-38-
4.2.1.4 Erfassung und Verarbeitung der Messwerte	-38-
4.2.2 Versuche	-43-

4.2.2.1	Versuchsstoffe	-44-
4.2.2.1.1	Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Quarz	-45-
4.2.2.1.2	Elektronenmikroskopische Untersuchungen des Leitungsschrottes	-46-
4.2.2.2	Versuchsablauf der Tast- und Hauptversuche	-49-
4.2.2.3	Planung der Versuchsreihen	-50-
5	Versuchsergebnisse	-51-
5.1	Ausgewählte Ergebnisse der Versuche zur Klassierung	-52-
5.2	Ausgewählte Ergebnisse der Versuche zur Sortierung	-63-
6	Versuchsauswertung	-73-
6.1	Auswirkungen der betrieblichen Einflussgrößen auf die Klassierungsergebnisse	-73-
6.1.1	Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 0 \text{ kV}$	-74-
6.1.2	Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 10 \text{ kV}$	-75-
6.1.3	Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 20 \text{ kV}$	-76-
6.2	Auswirkungen der betrieblichen Einflussgrößen auf die Sortierungsergebnisse	-77-
6.2.1	Analyse der Versuchsergebnisse auf der Basis des Trennerfolges	-78-
6.2.2	Ausgewählte Versuche mit günstigem Trennerfolg	-79-
6.2.3	Ausgewählte Versuche mit ungünstigem Trennerfolg	-80-
6.2.4	Trennerfolg in Abhängigkeit von betrieblichen Einflussgrößen	-82-
7	Berechnung von Flugbahnen mit einem neuen Rechenmodell	-85-
8	Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen	-94-
9	Zusammenfassung	-95-
10	Schrifttumsverzeichnis	-99-

1 Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
\bar{P}	m	Elektrodenabstand
\bar{P}	m	Abstand zwischen Walze- und Zylinderelektroden-Achse
\bar{P}	m	Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Zylinderelektrodenfläche und dem Koordinatenursprung
c_m	F	Messkondensatorkapazität
D	m	Walzendurchmesser
d_p	m	Korndurchmesser
\bar{e}_R	1	Einheitsvektor in R-Richtung
\bar{E}	V/m	Elektrische Feldstärke
f	s ⁻¹	Frequenz
$f_m(n)$	1	Verteilungssumme
\bar{F}_B	N	Elektrische Bildkraft
\bar{F}_E	N	Kraft im elektrischen Feld
\bar{F}_G	N	Schwerkraft
\bar{F}_K	N	Kontaktkräfte
\bar{F}_S	N	Summe der im Kornschwerpunkt angreifenden Kräfte
\bar{F}_W	N	Widerstandskraft
\bar{g}	m/s ²	Erdbeschleunigung
\bar{h}_a	m	Aufgabenhöhe
K	1	Korrekturfaktor (allgemein)
K_D	1	Korrekturfaktor für Druck und Temperatur
K_n	1	Korrekturfaktor für die Luftfeuchte
K_{EW}	1	Korrekturfaktor für das Elektrodensystem

P	m	Länge der Zylinderelektrode
ρ	m	Walzenlänge
m	kg	Masse
m_B	1	bezogene Massenverteilung
$\dot{m}(t)$	kg/s	Massenstrom
n	min ⁻¹	Walzendrehzahl
p_{sw}	N/m ²	Sättigungsdruck von Wasser
P	W	Elektrische Leistung
Q	As	Elektrische Ladung
ρ	m	Radius der Zylinderelektrode
r_P	m	Kornradius
ρ_r	m ⁻¹	Abgebildeter Radius der Zylinderelektrode
R	m	Walzenradius
R	Ω	Ohmscher Widerstand
R_w	kJ/(kg ,K)	Spezielle Gaskonstante von Wasser
R_r	m ⁻¹	Abgebildeter Radius der Walze
t	s	Zeit
T_{ECU}	1	Trennerfolg Kupfer
T_{EPVC}	1	Trennerfolg Polyvinylchlorid
U	V	Elektrische Spannung
v	m/s	Geschwindigkeit
P_L	m	Länge des Auffangkastens
P_w	m	Teilchenwurfweite
$''$	1	Abtrennungsgrad
$''_0$	$^\circ$	Elektrodenwinkelstellung
$\$$	1	Sortenreinheit
$\$$	$^\circ$	Aufenthaltswinkel eines Kornes
$*$	m ⁻¹	Abstand zwischen dem Ursprung der w-Ebene und dem Mittelpunkt des Zylinderkondensators

ϵ_0	As/(Vm)	Feldkonstante
ϵ_r	1	Permittivitätszahl
h	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
J	kg/m^2	Massenträgheitsmoment
η	Ns/m^2	Dynamische Zähigkeit
σ	$\text{m}/(\text{Vs mm}^2)$	Elektrische Leitfähigkeit
σ_s	1	Kornstreuung
μ_0	1	Statischer Reibbeiwert
μ	1	Dynamischer Reibbeiwert
B	1	3,14159
τ	s	Zeitkonstante
α	$^{\circ}$	Drehwinkel der Walze
α_p	$^{\circ}$	Drehwinkel des Kornes
φ	V	Elektrisches Potenzial
φ	1	Relative Luftfeuchtigkeit
ρ_{LMAX}	kg/m^3	Absolute Luftfeuchtigkeit gesättigter Luft
ρ_{LABS}	kg/m^3	Absolute Luftfeuchtigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit der Walze

2 Einleitung

Die Trennung von Rohstoffen nach wertvoll und nicht wertvoll erachteten Anteilen war und ist eine wichtige Aufgabe der Aufbereitungstechnik. Mit zunehmender Verknappung der Rohstoffe und der damit verknüpften Steigerung der Wertstoffpreise besteht ein starkes Interesse an der Entwicklung der Trennverfahren. Das gilt insbesondere für die elektrostatische Sortierung, einem der ältesten Trennverfahren.

Die ersten Versuche zur Trennung von Rohstoffen in elektrischen Feldern wurden schon um 1870 erfolgreich durchgeführt [1]. Danach folgte eine schnelle Entwicklung der elektromechanischen Sortierverfahren, die bis etwa 1920 andauerte [1]. In großtechnischen Anwendungen wurden Mineralkörnergemische nach stofflichen Unterschieden getrennt. So berichtete Johnson [1] von Anlagen, die täglich 100 000 kg Zinkerz anreicherten.

Mit dem Aufkommen der Schaumswimmaufbereitung verloren die elektromechanischen Sortierverfahren an Bedeutung, weil die Erzeugung hoher Gleichspannungen, die elektrische Festigkeit der Isolationswerkstoffe, die Handhabung der gewollten elektrischen Aufladungsvorgänge und damit auch die kontrollierte Kornbewegung im Trennraum Schwierigkeiten bereitete.

Trotzdem erlosch das Interesse an den trocken arbeitenden elektromechanischen Sortierverfahren zur Trennung körniger Feststoffe nie vollends, denn gegenüber den nassen Verfahren zeichnen sie sich aus durch

- *geringen Energieeinsatz,*
- *niedrige Betriebskosten,*
- *die Weite der sortierbaren Kornklassen,*
- *die Anwendbarkeit in trockenen Klimazonen.*

Ihre Nachteile liegen allerdings in der

- *Staubentwicklung und der*
- *notwendigen Vorbehandlung des Aufgabegutes.*

Die Vorbehandlung erstreckt sich z. B. auf die Schritte Klimatisierung und elektrische Voraufladung.

In den letzten Jahrzehnten wurden immer wieder Untersuchungen zur Verbesserung der Betriebsbedingungen durchgeführt. Dadurch konnte die Elektrosortierung insbe-

sondere bei der

- *Trennung von Mineralsanden*, wie Ilmenit, Rutil, Zirkon und Monzanit, *seltenen Erden* und *anderen Stoffen aus dem Pigmentitgefolge*

erfolgreich eingesetzt werden. Weitere Anwendungen sind:

- *Anreicherung von Eisenerzen*, insbesondere von hämatitischen Erzen zur Herstellung hochwertiger Konzentrate
- *Trennung von keramischen Rohstoffen* wie Feldspat, Flussspat, Quarz und Kaolin
- *Aufbereitung von Kabelschrott*, d. h. Trennung des zerkleinerten Aufgabematerials in Metall- und Isolierstoffanteile
- *Abtrennen von Asche und Schwefelverbindungen aus Kohle*
- *Aufbereitung von Elektronikschrott*
- *Rückgewinnung von Wertstoffen*, Trennung metallischer Rückstände von nichtleitenden Bestandteilen wie z. B. Papier-, Textil- und Kunststoffresten
- *Reinigung von Rohkaffee, Rohkakao und Tee*
- *Aufbereitung von Rohsalzen.*

Als aktuelles Beispiel für die kontinuierliche und erfolgreiche Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet neuer Verfahren zur Elektrosortierung sei hier das ELEKTROSTATISCHE TRENNVERFAHREN, das sogenannte *ESTA*-Verfahren (Singewald [30, 32, 33, 34]), angeführt. Dieses umweltfreundliche Verfahren wird inzwischen zur Sortierung aufgeschlossener Mineralsalze in mehreren deutschen Großanlagen, z. B. den hessischen Kaliwerken an der Werra, mit Durchsätzen bis etwa 1 000 000 kg/h eingesetzt.

Gesichtspunkte wie die Gewässerreinigung und die rationelle Energieverwendung machen die trocken arbeitenden elektromechanischen Sortierverfahren besonders interessant. Daher werden Verbesserungen der Elektrosortierung weltweit in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [51] angestrebt.

Dieses Ziel hat auch diese Arbeit. Insbesondere sollen etwaige Zusammenhänge zwischen elektrischer Kornladung und Trennschärfe beim Sortieren in quasielektrostatischen Feldern von Walzenscheidern untersucht werden. Daraus könnten sich neue Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

In einem ersten Schritt wird dazu die Kornbewegung unter dem Einfluss mechanischer

Kräfte untersucht - in einem anschließenden zweiten Schritt das Zusammenwirken von mechanischen und elektrischen Kräften.

Den theoretischen Ansätzen sind die jeweils notwendigen Experimente nachgeordnet. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse sollen theoretische Modelle entwickelt werden, die die Teilchendynamik im Trennraum umfassender als bisher berücksichtigen. Daher ist für die Experimente eine Versuchsanlage zu entwickeln, in der stoffliche, geometrische und betriebsbedingte Einflussgrößen hinreichend zu verändern sind.

Als Versuchsstoffe werden Quarz, PVC und Kupfer eingesetzt. Die zeitliche Abhängigkeit der elektrischen Kornladung wird durch rechnergestützte Messtechnik erfasst.

2.1 Grundprinzipien der Elektrosortierung

Mit Hilfe der Elektrosortierung lassen sich Gemische von Feststoffteilchen unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit in ihre Komponenten zerlegen. Dazu müssen auf ein Gemisch gezielt elektromechanische Kräfte einwirken, die Teilchen der jeweiligen Komponenten auf verschiedenen Bahnen im Prozessraum bewegen. Dieses Prinzip wird in *Freifallscheidern* und in *Walzenscheidern* verwirklicht.

Freifallscheider

Über den Einsatz von Freifallscheidern zur Aufbereitung von Kaliumverbindungen wurde bereits 1958 berichtet [2].

Das Schema eines von der deutschen Kaliindustrie [30] entwickelten Freifallsseiders zur Sortierung von Mineralsalzen ist in Bild 2.1.1 dargestellt.

Der Trennraum wird durch senkrecht angeordnete drehbare Zylinderelektroden begrenzt. Der Freifallscheider arbeitet bei einem Elektrodenabstand **$a = 250 \text{ mm}$** mit Gleichspannung von etwa 100 kV , so dass der Betrag der elektrischen Feldstärke im Scheider bei 4 kV/cm liegt.

Die vorab differenziert elektrisch aufgeladenen Salzgemischteilchen bewegen sich nach der Aufgabe unter dem Einfluss von Strömungskräften, von elektrischen Kräften und der Schwerkraft durch den Scheider. Dabei werden sie so horizontal abgelenkt, dass sie in der Auffangvorrichtung am Trennraumausgang als Komponenten vorliegen.

Feststehende Bürsten streifen anhaftende Staub- und Feingutteilchen außerhalb des Trennraumes von den rotierenden Elektroden ab.

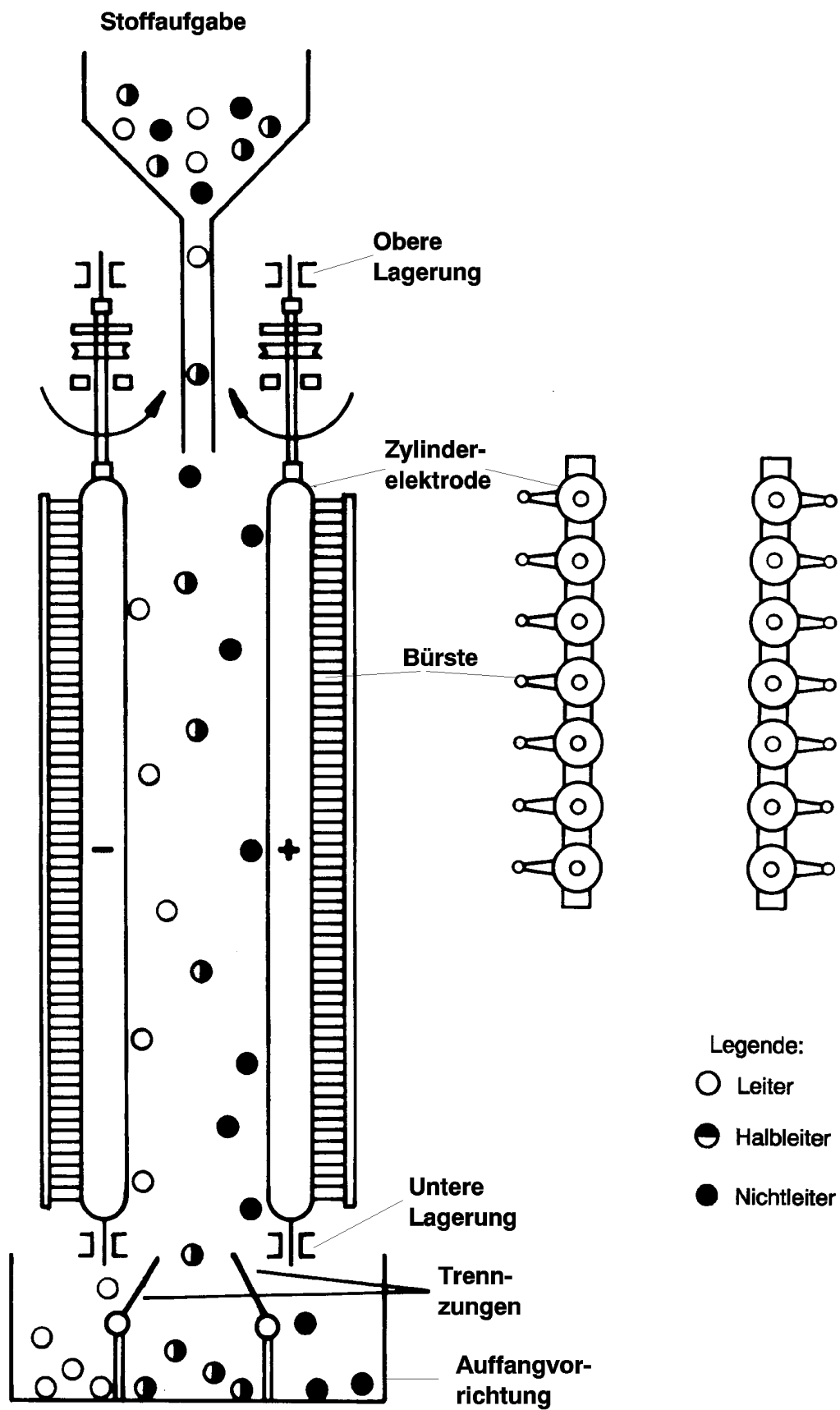
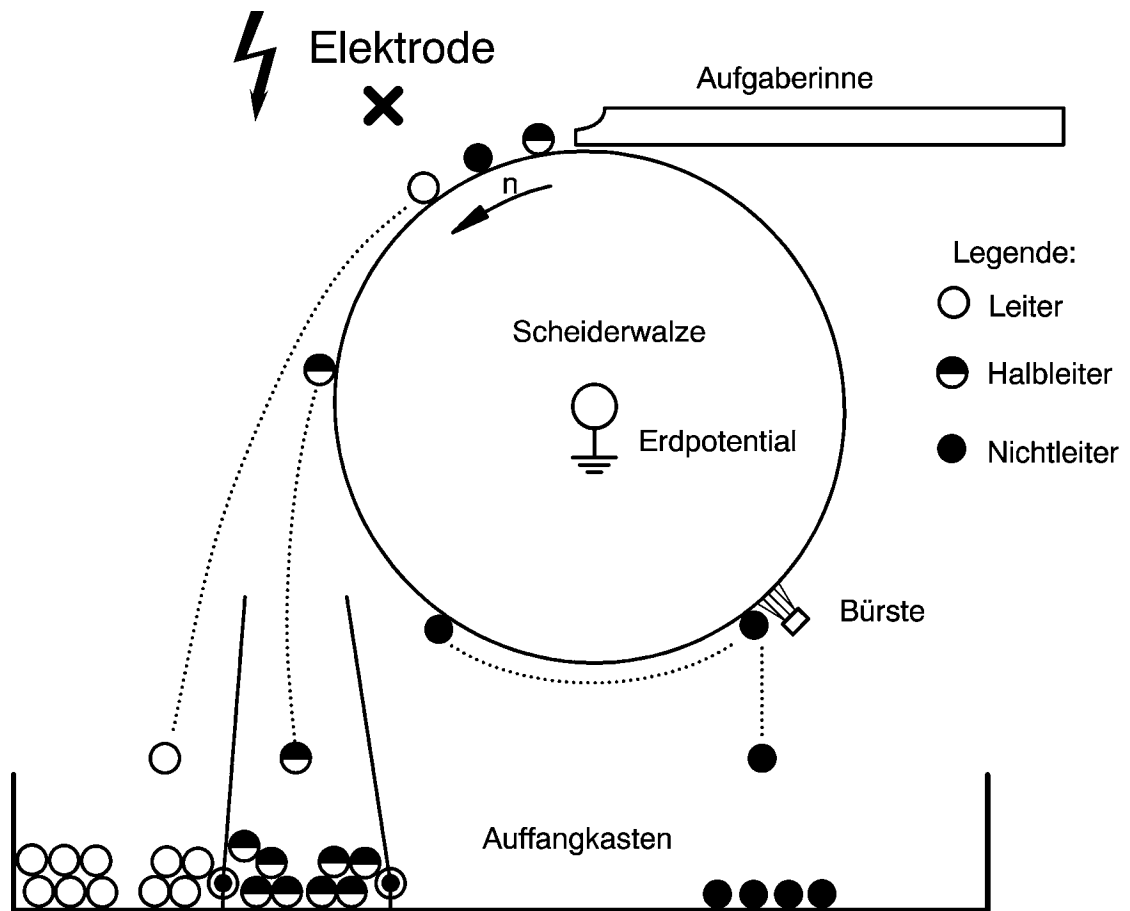


Bild 2.1.1
Schema eines Freifallscheiders

Walzenscheider

Im Bild 2.1.2 ist der prinzipielle Aufbau eines Walzenscheiders dargestellt.



✕ Mögliche Ausführungen der Elektrode


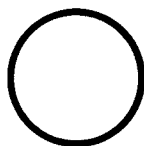
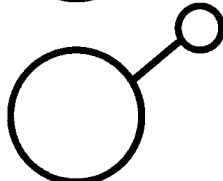
- | | | |
|----|---|-----------------------|
| a: |  | Sprühdrahtelektrode: |
| b: |  | Zylinderelektrode |
| c: |  | Kombinierte Elektrode |

Bild 2.1.2
Walzenscheider mit unterschiedlichen Elektrodenausführungen

Das zu trennende Stoffgemisch gelangt aus der Aufgabevorrichtung auf eine geerdete Metallwalze, die das Gemisch in den Trennraum bewegt. Zwischen der Walze und einer weiteren Elektrode wird eine hohe elektrische Gleichspannung angelegt, so dass sich die notwendige Feldstärke im Trennraum ausbildet.

Je nach der Ausführung des Elektrodensystems bzw. den jeweiligen Feldverhältnissen unterscheidet man:

- *Walzenscheider mit alleiniger Sprühdrahtelektrode bzw. Koronafeldwalzenscheider (Bild 2.1.2a)*
- *Walzenscheider mit alleiniger Zylinderelektrode bzw. Walzenscheider mit quasistatischem elektrischen Feld (Bild 2.1.2b)*
- *Walzenscheider mit kombinierten Elektroden bzw. Walzenscheider mit Koronafeld und quasistatischem elektrischen Feld (Bild 2.1.2c).*

Walzenscheider mit Sprühdrahtelektrode

Die Elektroden dieser Walzenscheiderausführung bestehen nur aus der geerdeten Walze und einer Drahtelektrode mit kleinem Durchmesser. Zwischen beiden Elektroden bildet sich ein sehr *inhomogenes, dynamisches elektrisches Feld* aus. Die hohe elektrische Feldstärke in der Drahtelektrodenumgebung ionisiert Luftmoleküle im Trennraum so, dass eine selbstständige Gasentladung (*Koronaentladung*) entsteht. In Drahtnähe befindet sich eine kleine Sprühzone (aktiver Bereich), in der positive und negative Ionen, freie Elektronen, angeregte und neutrale Moleküle sowohl untereinander als auch mit dem Draht in Wechselwirkung stehen. Zwischen der Sprühzone und der Walze erstreckt sich die wesentlich ausgedehntere Transportzone (passiver Bereich), die neben neutralen Luftmolekülen auch Ladungsträger enthält. Diese Ladungsträger bewegen sich unter Feldeinfluss vom aktiven Bereich zur Walze und sorgen im passiven Bereich für die Ausbildung elektrischer Raumladungen.

In dieses Raumladungsgebiet befördert die rotierende Walze das Stoffgemisch, das zunächst durch Ladungsanlagerungen gleichsinnig geladen wird. Nach dem Verlassen der Raumladungszone setzen dann Teilchenentladungen als Folge von Teilchenkontakten mit der geerdeten Metallwalze ein. Das Entladungsverhalten hängt im Wesentlichen von den Kontaktwiderstandsverhältnissen und den Teilchenoberflächenleitfähigkeiten ab. Geladene Körner mit hoher Oberflächenleitfähigkeit entladen sich schnell - sie haften schwach an der Walze und lösen sich früh von der Walzen-

oberfläche. Dagegen entladen sich Körner geringer Oberflächenleitfähigkeit langsam - sie haften stark an der Walze und lösen sich spät von der Walzenoberfläche.

Es lassen sich so nur Stoffe mit hinreichend hohen Leitfähigkeitsunterschieden voneinander trennen, wie sie z. B. zwischen Leitern und Nichtleitern, bzw. zwischen Leitern und Halbleitern gegeben sind. Im Bild 2.1.2 sind die Bewegungsbahnen von Leitern, Halbleitern und Nichtleitern prinzipiell dargestellt.

Nicht abgelöste Staub- und Feingutteilchen streift eine feststehende Bürste von der rotierenden Walze ab.

Walzenscheider mit Zylinderelektrode

Das Elektrodensystem dieser Walzenscheiderart besteht aus der rotierenden geerdeten Walze und einer Zylinderelektrode. Die Zylinderelektrode hat einen wesentlich größeren Durchmesser als die Drahtelektrode eines Koronafeldwalzenscheiders. Dadurch bildet sich im Trennraum ein *inhomogenes, quasistatisches elektrisches Feld* aus.

In dieses Feld transportiert die sich drehende Walze die elektrisch geladenen Körner. Ihre Anfangsladungen erhalten die Körner beispielsweise durch intensives Kontaktieren mit Hilfe von Aufgabeeinrichtungen, die als Vibratoren, Drehtrommeln, Zyklone oder Wirbelschichtapparate ausgeführt sind [19,36]. Im elektrischen Feld beeinflussen weitere Korn-Korn- bzw. Korn-Walze-Kontakte, sowie Polarisations- bzw. Influenzerscheinungen die Kornladungen.

Auf die geladenen Körner wirken dann im quasielektrostatischen Walzenscheiderfeld Kräfte, die zur Stofftrennung ausgenutzt werden.

Körner mit hohen elektrischen Oberflächenleitfähigkeiten, wie sie z. B. metallische Leiter aufweisen, geben Influenzladungen einer Polarität an die geerdete Walze ab. Wegen ihrer unipolaren Restladung werden solche Körner von der Walzenoberfläche abgestoßen - sie lösen sich früh von der Walze.

Körner mit geringeren Oberflächenleitfähigkeiten können je nach ihrem dielektrischen Verhalten sowohl Ladungen unterschiedlicher Polarität als auch unterschiedlichen Betrages aufweisen. Sie werden daher mehr oder weniger von der Walze angezogen bzw. mehr oder weniger abgestoßen.

Dadurch lassen sich z. B. auch unterschiedliche Nichtleitermaterialien voneinander trennen. Gleiches gilt für die Trennung unterschiedlicher Stoffe mit halbleitenden Eigenschaften. Von Fall zu Fall sind daher beim Trennen von Leitern und Nichtleitern

oder von Leitern und Halbleitern sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen des Trennerfolges möglich.

Walzenscheider mit kombinierten Elektroden

Walzenscheider mit kombinierten Elektroden weisen neben einer Sprühdrahtelektrode eine räumlich nachgeordnete Zylinderelektrode auf (Bild 2.1.2c). Beide Elektroden sind meist leitend miteinander verbunden.

Zwischen der sich drehenden Walze und der Drahtelektrode besteht ein Koronafeld, zwischen der rotierenden Walze und der Zylinderelektrode ein quasistatisches elektrisches Feld. Dadurch können Gemische wie mit einem Koronafeldwalzenscheider nach 2.1.2a getrennt werden. Das nachgeordnete quasistatische Feld verstärkt die Ablenkung der zuvor im Koronafeld aufgeladenen Teilchen. Vielfach sind dadurch Stofftrennungen mit größeren Trennschärfen möglich, als sie sich bei alleiniger Sprühfeldanwendung ergeben würden [12].

2.2 Schrifttumsübersicht

Über die Sortierung körniger Feststoffe in elektrischen Feldern gibt es ein umfangreiches Schrifttum, das hier in Bezug auf den jeweils betrachteten *Scheidergrundtyp* und die behandelten *Parameter* geordnet wurde.

Danach befasste sich die Mehrzahl aller Beiträge mit *Koronafeldwalzenscheidern* bzw. mit *Walzenscheidern*, die sowohl über *Korona-* als auch über *quasielektrostatische Felder* verfügten. Einen breiten Raum bei der Untersuchung der maßgeblichen elektromechanischen Vorgänge nahmen Fragen zur *Auslegung der Elektroden* ein. Für unterschiedlichste Elektrodengeometrien wurden mathematische Beziehungen zur Beschreibung der elektrischen Feldgrößen, wie etwa der Feldstärke und der Stromdichte, von Delon [3] und Cross [4] hergeleitet.

Die maximale *elektrische Ladung* Q_{max} , die ein kugelförmiges Korn im *Koronafeld* theoretisch annehmen kann, haben Ladenburg [5], Pauthenier [6, 7] und Mora [8] berechnet.

$$Q_{max} = \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \cdot \frac{3 \cdot \epsilon_r}{\epsilon_r + 2}$$

Mit:

ϵ_0 : elektrische Feldkonstante; ϵ_r : Permittivitätszahl;

d_p : Teilchendurchmesser; E : Betrag der elektrischen Feldstärke

Ladungsmessungen wurden in den Berichten von Mukai [9], Zimon [10] und Schumann [11] erwähnt. Hinweise auf den Messaufbau und den Messablauf unterblieben.

Die tatsächlich erzielbaren Ladungszustände körniger Feststoffe werden von Schubert [12] mit Merkmalen wie *der elektrischen Leitfähigkeit von Kornvolumen und Kornoberfläche, der Austrittsarbeit, der Permittivität, der Korngröße, der Kornform oder dem Übergangswiderstand zwischen Walze und Korn* in Verbindung gebracht. Elektrische Leitfähigkeiten reiner Minerale als Funktion der Temperatur haben Olofiniski, Novikova und Belov [13] für den Korngrößenbereich von $315 : \mu m$ bis $40 : \mu m$ ermittelt. Die Abhängigkeit der *relativen Oberflächenleitfähigkeit* $\bar{\epsilon}_{ro}$ von der *relativen Luftfeuchtigkeit* n untersuchten Kakovsky und Revnivitzev [50]. Für ausgewählte Mineralien gaben sie folgende Gleichung an:

$$\lg \epsilon_{ro} = -a + b \cdot \varphi.$$

Darin sind a und b mineralspezifische Konstanten. Allerdings blieb der Einfluss der Korngröße unberücksichtigt.

Mit einer selbst entwickelten Messzelle versuchten von Szantho/Hildenbrand [15] und Hildenbrand [16], die Leitfähigkeiten verschiedener körniger Mineralien in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Korngröße zu bestimmen. Anschließende Ablenkversuche am Koronafeldwalzenscheider führten zu der qualitativen Aussage: „Mit veränderter Luftfeuchtigkeit weisen die nichtleitenden hydrophoben, aber auch die hydrophilen Minerale die gleiche Tendenz hinsichtlich ihres Verhaltens am Walzenscheider und ihrer Leitfähigkeit auf.“

Kornübergangswiderstände als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit wurden von Schnitzler [17, 18] für einige Mineralien untersucht. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage seiner ausgiebigen Berechnungen zur Herleitung von Trennbedingungen im Feldraum zwischen einer *abgeschirmten Koronaelektrode* und der geerdeten Walze.

Delon [3] behandelte in seinen theoretischen Betrachtungen zur Erfassung des Trennvorganges eine Walzenscheiderausführung mit *kombinierten Elektroden*. Im Einflussbereich der Zylinderelektrode rechnete er vereinfachend mit einer konstanten Feldstärke. Beide Autoren bezogen in ihre Überlegungen zu den auf ein Mineralteilchen wirkenden Kräften lediglich die elektrischen Kräfte, die Schwer- und die Fliehkraft ein, während sie die Widerstandskräfte vernachlässigten.

Widerstandskräfte wurden dagegen von Cakir, Rozelaar und Wells [19] in Form der Reibkräfte bedingt berücksichtigt. Ihre Analyse der Einzelteilchenbewegung auf der Walzenoberfläche beschäftigte sich jedoch ausschließlich mit den mechanischen Kräften. Sie berechneten den Ort, an dem sich ein kugelförmiges Teilchen wieder von der Walze löst, und kennzeichneten diesen durch den Abwurfwinkel.

Meinander [20] wählte zur Berechnung der mechanischen Kräfte zwar nur den bereits von Schnitzler [17, 18] bzw. Delon [3] gemachten Ansatz, konnte aber durch seine verfeinerte Theorie der elektrischen Vorgänge neue Hinweise zum Abwurfwinkel und zu den im *Koronabereich beobachteten Gleit- und Springbewegungen* von Körnern geben.

Seine Teilchenbetrachtungen bezogen sich ausschließlich auf halbierte Rotationsellipsoide, deren Form und Größe er durch Angabe der beiden Hauptachsen **a** und **b** mit **a** > **b** beschrieb. Die Hauptachse **a** und der Radiusvektor der Walze verliefen antiparallel zur Normalen der Ellipsoidschnittfläche.

Vereinfachend rechnete auch Meinander mit einem homogenen äußeren Feld der Feldstärke **E**. Für den Sonderfall der ellipsoidförmigen Teilchen sind die inneren (depolarisierenden) Felder dann ebenfalls homogen. Die innere Feldstärke verläuft antiparallel zur äußeren Feldstärke. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge, die zwischen Teilchenform, äußerem und innerem elektrischen Feld bestehen, berechnete Meinander Kornladungen, elektrische Feldstärken und elektromechanische Kräfte. Z. B. führte die Berechnung der maximalen Kornladung **Q_{max}**, die ein idealer Leiter bzw. ein idealer Nichtleiter im Koronafeld annimmt, zu folgenden Ergebnissen:

$$\text{Idealer Leiter :} \quad Q_{Lmax} = \frac{1}{k_1} \cdot \pi \cdot b^2 \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

$$\text{Idealer Nichtleiter :} \quad Q_{ISmax} = - \frac{\epsilon_r}{1 - k_1} \cdot \pi \cdot b^2 \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

Mit:

k₁ = **k₁ (a/b)**: Depolarisationsfaktor; **b**: Hauptachsenlänge; **ε₀**: elektrische Feldkonstante; **E**: Betrag der elektrischen Feldstärke; **ε_r**: Permittivitätszahl

Meinander stellte fest: Die Springbewegungen der Teilchen im Koronabereich hängen von denjenigen Ladungen ab, die sie in dem Augenblick tragen, in dem der Teilchenkontakt zur Walze abreißt.

Walzenscheider mit *Sprühdraht- bzw. mit kombinierten Elektroden* haben sich in der Praxis der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe bewährt. Davon zeugen Anwendungsbeispiele, wie die Gewinnung von Diamanten aus schweren Begleitmineralien [21], die Trennung unterschiedlicher Schwermineralsande, über welche die Firma Lurgi [22], Stieler [23], V. Szantho [24], Kirchberg [25], Schubert [12] und Moore [26] berichteten, die Anreicherung hämatitischer Eisenerze [12, 26] oder die Regenerierung von Siliziumkarbid und Korund aus Stäuben der Schleifscheibenbearbeitung [25]. Die Aufbereitung ballastreicher Steinkohlen, insbesondere die Verminderung der Asche- und Schwefelgehalte, wurde in den Beiträgen von Olofinskii [27], Mukai [9], Monostory, Pickardt, V. Szantho [28] und Schnitzler [17, 18] behandelt.

Starkes Interesse besteht daran, Walzenscheider mit kombinierten Elektroden zur Rückgewinnung fester, aufgeschlossener Wertstoffe einzusetzen. Es sollen unmagnetische metallische Rückstände von nichtleitenden Bestandteilen wie Papier-, Textil- oder Kunststoffresten getrennt werden [14, 29, 51].

Freifallscheider, häufig auch Kammerscheider genannt, setzen *elektrostatische Felder* ein, die je nach Ausführung der Elektroden mehr oder weniger homogen sind. Schrifttumshinweise auf Erprobungen von Freifallscheidern zur Phosphat, Feldspat- und Kalisalzaufbereitung finden sich in der US-Patentschrift 2 762 502 von Lawver (Quelle: [30]) und den Aufsätzen von Le Baron e. a. [2, 31]. Nach energieaufwendiger Trocknung ließ sich das Aufgabegut durch Kontaktpolarisation unterschiedlich elektrisch aufladen. Anschließend folgte die Abtrennung der Gemischanteile im Scheider (Bauart: "Le Baron-Lawver" [12]). Dieses Verfahren konnte sich u. a. wegen der geringen Trennschärfe nicht in der Praxis durchsetzen.

Dagegen gelang es der deutschen Kaliindustrie nach jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit, Kalirohsalze mit dem "ELEKTROSTATISCHEN TRENNVERFAHREN", dem *ESTA*-Verfahren, erfolgreich in Großanlagen aufzubereiten (Singewald [32, 33], Singewald und Fricke [34, 30]). Aufgeschlossene Rohsalzgemische werden dabei in folgenden Stufen vorbehandelt:

- *Aufbringen von Reagenzien in einem Mischer*
- *Erwärmung des Gemisches*
- *Einstellen der erforderlichen relativen Luftfeuchtigkeit und*
- *Aufladen des Salzes durch Kontaktierung in Luft.*

Die Vorbehandlung beeinflusst gezielt die elektrischen *Ladungszustände der Teilchenoberflächen*. Die so vorbereiteten Salzgemischteilchen werden dann im homogenen elektrischen Feld eines Freifallscheiders (Bild 2.1.1) sortiert.

Die jeweils gewählten Prozessbedingungen haben nicht nur einen entscheidenden Einfluss auf die Reinheit der Produkte, sondern sie eröffnen auch weitere Möglichkeiten zur Stofftrennung, die nach Singewald und Fricke [34] über die eigentliche Salzaufbereitung hinausgehen:

Niermöller [35] untersuchte Ladungsverteilungen in Mineralgemischen, die er synthetisch aus den Stoffpaarungen Quarz-Kalkspat bzw. Anthrazit-Quarz zusammenstellte. Zuerst berechnete er die Endablenkungen, die kugelförmige Teilchen mit konstanter Oberflächenladungsdichte nach Durchfallen eines homogenen elektrischen Feldes erreichen. Dann ließ er vorbehandelte Teilchen durch einen Laboratoriumsfreifallscheider fallen, um sie am Scheiderausgang mit Faradaybechern wieder aufzufangen [36]. Die Becher waren an eine Ladungsmesseinrichtung der Firma Keithley [37, 38] angeschlossen. Die gemessenen Bechernettoladungen rechnete Niermöller in mittlere Teilchenoberflächenladungsdichten um, denen Endablenkungen zugeordnet wurden.

Niermöller stellte eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung fest. Bemerkenswert bleibt, dass seine Sortierversuche erfolgreich verliefen, sofern bei der Vorbehandlung der Einfluss der Luftfeuchtigkeit beachtet wurde.

Über *Walzenscheider mit quasielektrostatischen Feldern* wurde bisher nur wenig berichtet. Die weitgehend auf Erfahrungen mit Mineralgemischtrennungen beruhenden Erkenntnisse nutzten z. B. Autoren wie Ralston [39], Olofinskii [27], Johnson [1] oder Kirchberg [40], um relativ einfache, eher qualitative Vorstellungen über den komplexen Verlauf des Trennprozesses zu entwickeln. Die meisten Autoren unterschieden z. B. nicht zwischen Teilchen- und Walzengeschwindigkeit oder betrachteten ausschließlich homogene elektrische Felder. Auf dieser Grundlage konnten kaum genauere Aussagen über den Trennvorgang gewonnen werden.

Ansätze einer quantitativen Beschreibung der Sortierung mittels elektrostatischer Felder finden sich in den Arbeiten von Schickel [41, 42]. Für die Sortierung im nahezu homogenen elektrischen Feld einer ruhenden Gitter-Platte-Elektrodenanordnung wurden überschaubare Trennbedingungen ermittelt. Diese Bedingungen sollten gleichsam Anhaltspunkte zur Trennbarkeit von Mehrstoffhaufwerken im inhomogenen Feld eines Walzenscheiders mit Stabelektrode liefern. Schickel setzte Mischungen aus Zirkon und

Rutil ein. Die Körner hatten eine sphärische Kornform, die Korngröße lag zwischen $500 : \mu m$ und $60 : \mu m$. Es wurde das Masseausbringen in Abhängigkeit von der Walzendrehzahl und der Elektrodenspannung bei den konstant gehaltenen Einflussgrößen Elektrodenstellung, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur untersucht.

Erst Schautes [43] behandelte den Bewegungsablauf von Einzelkörnern und deren elektrischer Ladung im quasielektrostatischen Feld eines Walzenscheiders umfassender. Zunächst berechnete er Kornflugbahnen im Trennraum unter Einbeziehung von Reibbeiwerten, Korngrößen und Walzendrehzahlen ohne äußeres elektrisches Feld. Anschließend überprüfte er die Ergebnisse experimentell durch Erfassung des Abwurfwinkels und der Wurfweite bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von $n = 40 \%$. Als Versuchsstoffe dienten zum einen Quarz und zum anderen Feldspat in vier Kornklassen des Korngrößenbereiches von $500 : \mu m$ bis $100 : \mu m$. Es zeigte sich, dass die statischen Reibbeiwerte zu hoch ausfielen - was auf den Einfluss von Haftkräften und Oberflächenrauigkeiten zurückgeführt wurde. Dagegen ergaben sich verhältnismäßig niedrige dynamische Reibbeiwerte - was mit eventuellen Rutsch- und Rollbewegungen von Körnern erklärt wurde.

Danach stellte er Betrachtungen zu Kornflugbahnen unter Berücksichtigung eines äußeren inhomogenen elektrostatischen Feldes zwischen Walze und Stabelektrode bei relativen Luftfeuchten von 40% bis 82% an. Die zusätzlichen Einflüsse, die das Feld auf Abwurfwinkel und Wurfweite der Teilchen ausübte, erfasste Schautes in Abhängigkeit von Elektrodenspannung und Elektrodenstellung.

Unter der Voraussetzung, dass die Kornladung von der Stoffaufgabe bis zum Abwurf konstant bleibt, wurden für *angenommene Ladungswerte Abwurfwinkel* und *mittlere Wurfweite berechnet*. Aus den Vergleichen zwischen Rechen- und Messergebnissen schloss Schautes auf die elektrischen Oberflächenladungen, die Einzelkörner nach Verlassen der Walze getragen hatten.

Ergänzend dazu wurde das Aufladungsverhalten von Quarz und Feldspat im *nahezu homogenen elektrischen Feld einer Gitter-Platte-Elektrodenanordnung* [41, 42] mit dem Ziel erforscht, etwaige Erkenntnisse auf Walzenscheider zu übertragen. Dabei diente der Abhebevorgang geladener Stoffteilchen von der Platte der Bestimmung der Aufladezeitkonstanten J , die als Produkt eines Kornwiderstandes R_p und einer elektrischen Kornkapazität C_p ausgedrückt wurde. Mit Kenntnis der Zeitkonstanten und der nach Delon [3] berechneten Kornkapazität, konnte der Kornwiderstand ebenfalls angegeben werden. Diese Kornwiderstandsergebnisse verglich Schautes dann mit denjenigen, die sich aus eigenen Leitfähigkeitsmessungen [16] ergaben.

Seine Studien zeigten, dass Einzelkornwiderstände bei Anwendung der erwähnten Methoden nur größenordnungsmäßig abschätzbar sind. Da die Kontaktverhältnisse der Gitter-Platte-Anordnung ausschließlich *unipolare Teilchenladungen* zuließen, waren diese Ergebnisse schwerlich auf Walzenscheider übertragbar. Für Walzenscheider musste nämlich je nach Wurfweite sogar die Existenz *bipolarer Teilchenladungen* vorausgesetzt werden. Die Untersuchungen der Stoffe Quarz und Feldspat erfolgten gesondert - *Sortiervorgänge wurden also nicht betrachtet*.

Schautes gab neben den bisher eher qualitativen auch eine quantitative Beschreibung des Teilchenverhaltens im elektrischen Feld an, die einen wesentlichen Fortschritt für die grundsätzliche Beurteilung des Walzenscheidereinsatzes bedeutete.

2.3 Problemstellung für die eigenen Untersuchungen

Das Schrifttumsstudium ergab, dass zur *Sortierung von Rohstoffen in quasielektrostatischen Walzenscheiderfeldern* noch wesentliche Fragen zum Bewegungs- und Ladungsverhalten der Stoffe im Trennraum unbeantwortet blieben.

Einerseits lag das an der überwiegend auf empirischer Basis beruhenden Verfahrensentwicklung, die nicht ebenso systematisch wie bei den Freifallscheidern erfolgte. Andererseits erschwerte die große Anzahl relevanter Einflussgrößen das Verständnis der komplexen Vorgänge.

Leider führten diese Tatsachen bei Walzenscheidern oftmals nur zu mehr oder weniger oberflächlichen Betrachtungsweisen. Z. B. differenzierten einige Autoren nicht deutlich zwischen der *Sortierung im Koronafeld* und der *Sortierung im quasielektrostatischen Feld*. Dieser Unterschied wurde deshalb in den vorangegangenen Kapiteln besonders herausgestellt, um auf ein Kernproblem der Sortierung mit Walzenscheidern, nämlich die Wechselwirkungen zwischen jeweiliger *Kornladungsdynamik* und der *Kornbewegung im Trennraum*, hinzuarbeiten.

Für *Sortierprozesse in quasielektrostatischen Feldern von Walzenscheidern* wurde diese bedeutende Fragestellung bisher nur ansatzweise von *Schickel [41]* behandelt.

Die vorliegende Arbeit hat daher das Ziel, den Einfluss des Bewegungs- und Ladungsverhaltens körniger Stoffe auf das Trennergebnis von Sortierprozessen in *quasielektrostatischen Walzenscheiderfeldern* zu untersuchen. Dazu ist ein neues physikalisch/mathematisches Modell zu entwickeln, das die Bewegung von Einzelkörnern im inhomogenen Walzenscheiderfeld hinreichend beschreibt. Die Tauglichkeit dieses

Modells ist experimentell zu prüfen. Bessere *Trennergebnisse* und neue *Anwendungsmöglichkeiten* werden angestrebt.

Abweichend von der punktuellen Beschreibung der Kornbahnen durch Abwurfwinkel und Wurfweite, bedarf es sowohl der Erfassung der Korn- als auch der Scheiderwalzenbewegung. Die Bewegungsabläufe wiederum beeinflussen die elektrischen Kornladungen, die u. a. von der Feldstärke, den Umweltbedingungen und den Guteigenschaften abhängen. Das Verhalten der elektrischen Stoffladung hat daher zentrale Bedeutung für den Verlauf derartiger Sortiervorgänge.

Wie *Schautes [43]* zeigte, sind die *realen Ladungszustände* des Versuchsgutes nicht aus Ersatzbetrachtungen abzuleiten. In Walzenscheidern mit inhomogenen, quasielektrostatischen Feldern wären *unmittelbare* und *rückwirkungsfreie Ladungsmessungen unter Betriebsbedingungen* notwendig.

Dazu muss die *anspruchsvolle experimentelle Aufgabe* gelöst werden, *geringe elektrische Kornladungen* auch bei Anwesenheit starker externer elektrischer Felder zuverlässig zu *messen*. Die *elektrische Feldstärke* im Trennraum zwischen Walze und Zylinderelektrode wäre zu *berechnen* - Messungen der Feldstärke führen wegen der Rückwirkungen der Messeinrichtungen auf das ursprüngliche Feld nicht zum Erfolg.

Das zu entwickelnde *Modell* soll sowohl die *zeitabhängige Kornladung* und die *ortsabhängige Feldstärke* als auch die *äußere Reibung* bei der Berechnung der Flugbahnen berücksichtigen. Die Tauglichkeit des Modells wäre dann durch den Vergleich zwischen berechneten und experimentell ermittelten Flugbahnen der Körner zu prüfen.

Daher werden die für den Trennprozess wesentlichen Einflussgrößen im nachfolgenden Kapitel behandelt.

3 Wesentliche Einflussgrößen

Bei einem Walzenscheider mit Zylinderelektrode ist die Zielgröße Wurfweite R_w von Teilchen bzw. deren Flugbahn nur sichtbares Merkmal für den Ablauf des Trennvorganges. Die Wurfweite bzw. die Flugbahn wird vor allem von physikalischen Größen wie der Teilchenaufladung, der Feldstärke und der Walzendrehzahl beeinflusst.

Die wesentlichen Einflussgrößen zur Stofftrennung in Walzenscheidern mit Zylinderelektrode sind nachfolgend aufgeführt. Dabei wurde nach der Zielgröße des zu untersuchenden Prozesses, den konstruktiven, stofflichen und betrieblichen Einflussgrößen sowie den zu berücksichtigenden Konstanten gegliedert. Die ermittelten Einflussgrößen sind in einer Relevanzliste erfasst.

3.1 Zielgröße

- 1 Wurfweite R_w , Flugbahn der Teilchen

3.2 Konstruktive Einflussgrößen

- 2 Walzenlänge L
- 3 Walzendurchmesser B
- 4 Durchmesser der Zylinderelektrode B
- 5 Länge der Zylinderelektrode L
- 6 Breite eines Auffangfaches x
- 7 Länge des Auffangkastens R_L
- 8 Abstand Walzenachse - Auffangkastenoberkante P_o
- 9 Aufgabehöhe R_a

3.3 Stoffliche Einflussgrößen

- 10 Stoffdichte k
- 11 Korngröße d_p
- 12 Kornoberflächenstruktur
- 13 Kornform
- 14 Maximale elektrische Kornladung Q_{max}
- 15 Massenträgheitsmoment eines Teilchens 2_p
- 16 Austrittsarbeit W_A
- 17 Statischer Reibbeiwert μ_s des Systems Korn - Walze
- 18 Dynamischer Reibbeiwert μ_d des Systems Korn - Walze
- 19 Elektrische Permittivität $\epsilon: \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
- 20 Elektrische Leitfähigkeit σ
- 21 Sättigungsdruck von Wasser p_{sw}
- 22 Absolute Luftfeuchtigkeit n_{LABS}

3.4 Betriebliche Einflussgrößen

- 23 Massenstrom der Aufgabe $m_A(t)$
- 24 Teilchengeschwindigkeit bei der Aufgabe auf die Walze v_{op}
- 25 Vibrationsfrequenz der Aufgaberinne f
- 26 Amplitude der Schwingrinne A

- 27 Walzendrehzahl n
- 28 Temperatur h
- 29 Relative Luftfeuchte n
- 30 Elektrodenspannung U
- 31 Elektrodenabstand \bar{P}
- 32 Elektrodenwinkel $''_o$
- 33 Elektrische Kornladung Q

3.5 Konstanten

- 34 Erdbeschleunigung $\bar{g} = - \bar{E}_y \text{ } 9,81 \text{ m/s}^2$
- 35 Elektrische Feldkonstante $g_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$
- 36 Dynamische Zähigkeit der Luft $O = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ bei $h = 20^\circ\text{C}$
- 37 Spezielle Gaskonstante von Wasserdampf $R_w = 0,461 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{K)}$

3.6 Relevanzliste

Die vorher aufgelisteten Einflussgrößen sind nachfolgend als Relevanzliste aufgeführt. Auf der Basis der Relevanzliste wurde die Tabelle 3.6.1: „Dimensionsmatrix“ erstellt. Mit dem Ziel, einen vollständigen Kennzahlensatz herzuleiten, konnte die Dimensionsmatrix durch

- Multiplikation der dritten Zeile mit 3 und Addition zur ersten Zeile sowie
- Multiplikation der zweiten Zeile mit (-1) und Addition der fünften Zeile

in die Tabelle 3.6.2: „Überführte Dimensionsmatrix“ umgewandelt werden.

Aus der überführten Dimensionsmatrix ergibt sich ein Kennzahlensatz, der mit seinen 30 relevanten Einflussgrößen und den fünf Grundgrößen m , s , kg , K und A genau 25 "B-Kennzahlen" liefert. Bei genau 25 "B-Kennzahlen" ist kein Vorteil in der Behandlung der Problematik mit Kennzahlen zu erwarten.

Die herausgearbeiteten Abhängigkeiten weisen deutlich auf die Komplexität hin, Trennvorgänge in quasielektrostatischen Feldern von Walzenscheidern mit Zylinderelektroden umfassend zu beschreiben. Daher wird hier der Weg gewählt, ein Modell für den Trennvorgang zu entwickeln, dessen Gültigkeit durch Versuche zu prüfen bzw. zu bestätigen ist.

Relevanzliste:

$$f(D; n; d; \mathbf{k} \mathbf{h} \mathbf{Q}; d_p; d; y_0; h_a; A; a; x_w; \mathbf{2}_p; \dot{m}_A; f; U; W_A; v_{op}; v_p; g; i; \mathbf{n}_{LABS}; p_{SW}; R_W; \mathbf{Q} \mathbf{n}''_0; \dot{s}; \dot{d}) = 0$$

Tabelle 3.6.1: Dimensionsmatrix

	D	n	\mathbf{k}	\mathbf{hQ}	d_P	d	y_0	h_a	A	a	x_w	$\mathbf{2}_p$	\dot{m}_A	f	U	W_A	v_{op}	v_p	g	i	\mathbf{n}_{LABS}	p_{SW}	R_W	\mathbf{Q}	\mathbf{n}''_0	\dot{s}	\dot{d}	
m	1	0	-3	0	0	1	1	1	1	1	1	2	0	0	2	2	1	1	1	-3	-3	-3	-1	2	-1	0	0	0
s	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-3	-2	-1	-1	-2	4	3	0	-2	-2	-1	0	0	0
kg	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	-1	-1	1	1	0	1	0	0	0
K	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	
A	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 3.6.2: Überführte Dimensionsmatrix

	D	n	\mathbf{k}	\mathbf{hQ}	d_P	d	y_0	h_a	A	x_w	$\mathbf{2}_p$	\dot{m}_A	f	U	W_A	v_{op}	v_p	g	i	n_{LABS}	p_{SW}	R_W	\mathbf{O}	\mathbf{n}	$\mathbf{''}_0$	$\mathbf{:}_S$	$\mathbf{:}_d$
m	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	5	3	0	5	5	1	1	1	-6	0	0	2	2	0	0	0	0
s	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	1	1	2	-2	-1	0	2	2	1	0	0	0
kg	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	-1	-1	1	0	1	1	0	0	0
K	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
A	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0

4 Untersuchung der elektromechanischen Einflussgrößen

Nach der Behandlung der relevanten Einflussgrößen werden *nun neue und umfassendere theoretische Betrachtungen* angestellt, Bahnkurven bzw. Wurfweiten von Teilchen in Walzenscheidern mit Zylinderelektrode mit Hilfe eines Rechenprogramms zu ermitteln. Weiterreichende *praktische Untersuchungen* sollen die *neuen theoretischen Ansätze* untermauern.

4.1 Theoretische Betrachtungen

Die theoretischen Betrachtungen haben das Ziel, ein Rechenprogramm zu entwickeln, mit dem das Problem der Kornbewegung numerisch gelöst wird. Dazu sind die Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Kornbahnkurven aufzustellen, die folgendes berücksichtigen:

- die Feld- und Kontaktkräfte
- die Fälle „Rutschen“ und „Rollen“ eines Teilchens
- die ortsabhängige elektrische Feldstärke
- die ort- und zeitabhängige elektrische Teilchenladung
- die Temperaturabhängigkeit und
- die Abhängigkeit von der Luftfeuchte.

4.1.1 Bewegungsgleichungen zur Berechnung der Kornbahnkurven

Im Bild 4.1.1.1 ist das mechanische System aus Walze und Korn dargestellt.

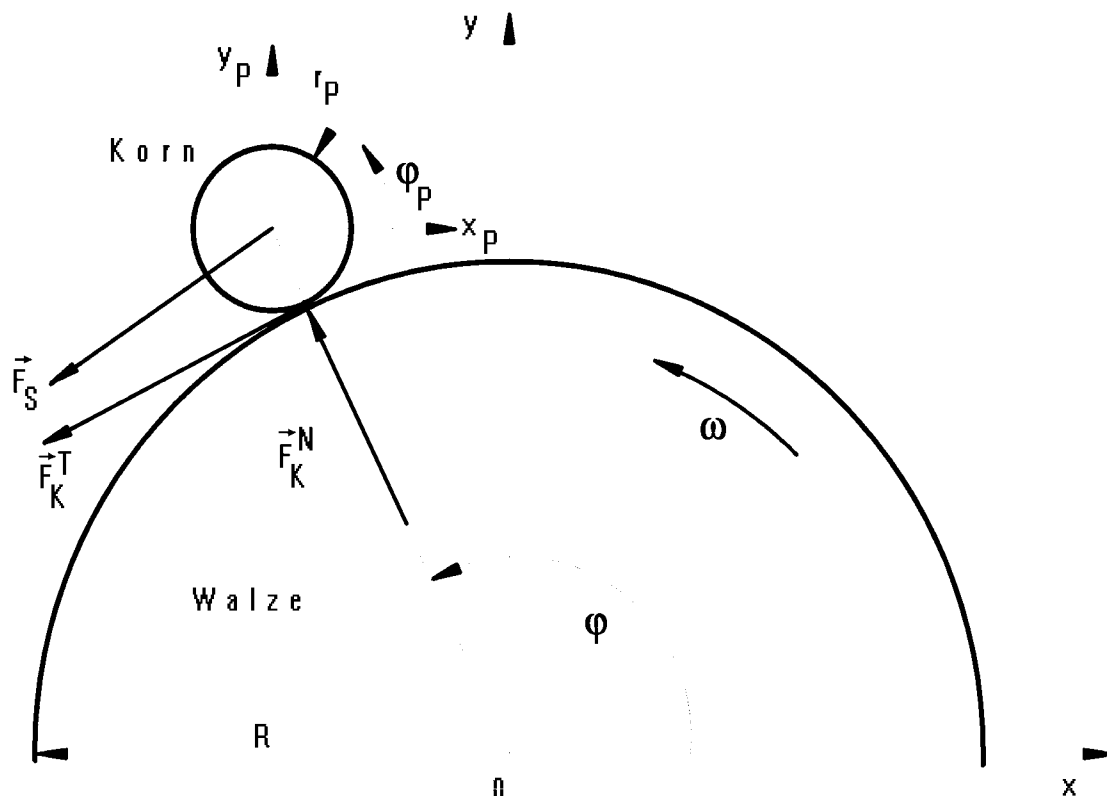


Bild 4.1.1.1 Mechanisches System Walze - Korn

Die sich drehende Walze wird durch ihren Radius R und ihre Winkelgeschwindigkeit ω beschrieben. Der momentane Aufenthaltsort des kugelförmigen Kornes hat die Polarkoordinaten: Radius r_p und Winkel θ_p .

Auf das bewegte Korn mit der Masse m , dem Kornradius r_p und dem Drehwinkel θ_p wirken

- die Feldkräfte F_s , die im Kornschwerpunkt angreifen, und
- die Kontaktkräfte F_K , an der Kontaktstelle zwischen Walze und Korn.

An der Kontaktstelle gilt für die Tangentialkomponente der Bahngeschwindigkeit:

$$R \cdot \omega = (R + r_p) \cdot \dot{\phi} - r_p \cdot \dot{\phi}_p$$

Als Summe der Momente um den Kornschwerpunkt ergibt sich mit dem Massenträgheitsmoment θ_p des Kornes:

$$\theta_p \cdot \ddot{\phi}_p = -F_K^T \cdot r_p \quad \text{mit} \quad \theta_p = 0,4 \cdot m \cdot r_p^2$$

Für die Summe der Kräfte in Richtung der Normalen folgt:

$$-(R + r_p) \cdot \dot{\phi}^2 \cdot m = F_K^N + F_s^N$$

Die Summe der Kräfte in Tangentialrichtung lautet:

$$(R + r_p) \cdot \ddot{\phi} \cdot m = F_K^T + F_s^T$$

Bei konstanter Walzengeschwindigkeit $R \cdot \omega$ folgt nach Differentiation aus der kinematischen Beziehung für den Vorgang des Rollens:

$$(R + r_p) \cdot \ddot{\phi} = r_p \cdot \ddot{\phi}_p \quad \text{und damit:} \quad m \cdot r_p \cdot \ddot{\phi}_p = F_K^T + F_s^T.$$

Ferner gilt:

$$m \cdot r_p \cdot \ddot{\phi}_p = -F_K^T \cdot \frac{m \cdot r_p^2}{\theta_p}$$

Nach Gleichsetzen der beiden letzten Gleichungen folgt daraus die tangentielle Kontaktkraft:

$$\mathbf{F}_K^T = - \frac{\mathbf{F}_S^T}{1 + \frac{m \cdot r_P^2}{\theta_P}}$$

Rutscht das Korn, so ergibt sich die tangentielle Kontaktkraft aus der Normalkraft, aus der Gleitreibungszahl μ und aus der Richtung der aneinander vorbei gleitenden Flächen zu:

$$\mathbf{F}_K^T = \mu \cdot \mathbf{F}_K^N \cdot \text{sgn} [\mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\omega} + \mathbf{r}_P \cdot \dot{\boldsymbol{\phi}}_P - (\mathbf{R} + \mathbf{r}_P) \cdot \dot{\boldsymbol{\phi}}]$$

4.1.2 Berechnung der Feldkräfte

Im Schwerpunkt des Kornes greifen die Feldkräfte \mathbf{F}_S an, die sich zusammensetzen aus

- ! der Schwerkraft \mathbf{F}_G ,
- der Widerstandskraft \mathbf{F}_W ,
- der elektrischen Bildkraft \mathbf{F}_B und
- der elektrischen Feldkraft \mathbf{F}_E .

Die Bedeutung dieser einzelnen Kräfte wird im folgenden erläutert.

Die Schwerkraft

Die Schwerkraft \mathbf{F}_G ergibt sich aus dem Grundgesetz der Mechanik:

$$\mathbf{F}_G = - m \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{e}_y$$

m : Masse eines Kornes
 \mathbf{g} : Betrag der Erdbeschleunigung
 \mathbf{e}_y : Basisvektor in y-Richtung

Die Widerstandskraft

Nach Stokes wirkt auf das in Luft bewegte Korn die Widerstandskraft \mathbf{F}_W bei laminarer Strömung:

$$\mathbf{F}_W = - 6 \cdot \pi \cdot \eta_L \cdot \mathbf{r}_P \cdot \mathbf{v}$$

η_L : dynamische Zähigkeit der Luft
 \mathbf{v} : Geschwindigkeit des Kornes

Die elektrische Bildkraft

Befindet sich auf der geerdeten Walze ein Korn, das die elektrische Ladung Q_p trägt, so sammeln sich auf der Walze influenzierte Ladungen $-Q_p$. Diese Influenzladungen ziehen das Korn mit der Kraft \vec{F}_B an. \vec{F}_B ist mit Hilfe einer Ersatzladungsanordnung zu berechnen, bei der sämtliche Influenzladungen als Spiegelladung $-Q_p$ zur Kornladung Q_p aufzufassen sind. Gespiegelt wird an der metallischen Walzenoberfläche, die sowohl für das elektrische Feld der Original- als auch der Ersatzladungsanordnung Äquipotenzialfläche ist. Danach kann die Kraft \vec{F}_B , die man als Bildkraft bezeichnet, mit der folgenden mathematischen Beziehung beschrieben werden:

$$\vec{F}_B = - \frac{Q_p^2}{16 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_p^2} \cdot \vec{e}_R$$

ϵ_0 : Feldkonstante
 \vec{e}_R : Basisvektor in R-Richtung

Die elektrische Feldkraft

Das elektrische Feld zwischen Walze und Zylinderelektrode übt auf ein Korn mit der elektrischen Ladung Q_p die Kraft \vec{F}_E aus:

$$\vec{F}_E = Q_p \cdot \vec{E}$$

Q_p : Elektrische Ladung eines Kornes
 \vec{E} : Elektrische Feldstärke

Die elektrische Feldstärke \vec{E} im Trennraum des Walzenscheiders wird nachfolgend berechnet.

Berechnung des quasielektrostatischen Feldes im Trennraum

Das quasielektrostatische Feld im Trennraum des Walzenscheiders kann näherungsweise als ebenes Feld aufgefasst werden. Für die Berechnung wird die Methode der konformen Abbildung gewählt, die u. a. Binns/Lawrenson [44], Prinz [45], Philippow [46] und Wolff [47] in ihren Lehrbüchern behandeln. Für den Walzenscheider laufen die Feldberechnungen schrittweise wie folgt ab:

1. Schritt:

Das Elektrodensystem aus *Walze und Zylinderelektrode* nach Bild 4.1.2.1 wird mit der analytischen Funktion $\underline{w} = 1/\underline{z}$ in die *Zylinderkondensatoranordnung* nach Bild 4.1.2.2 überführt.

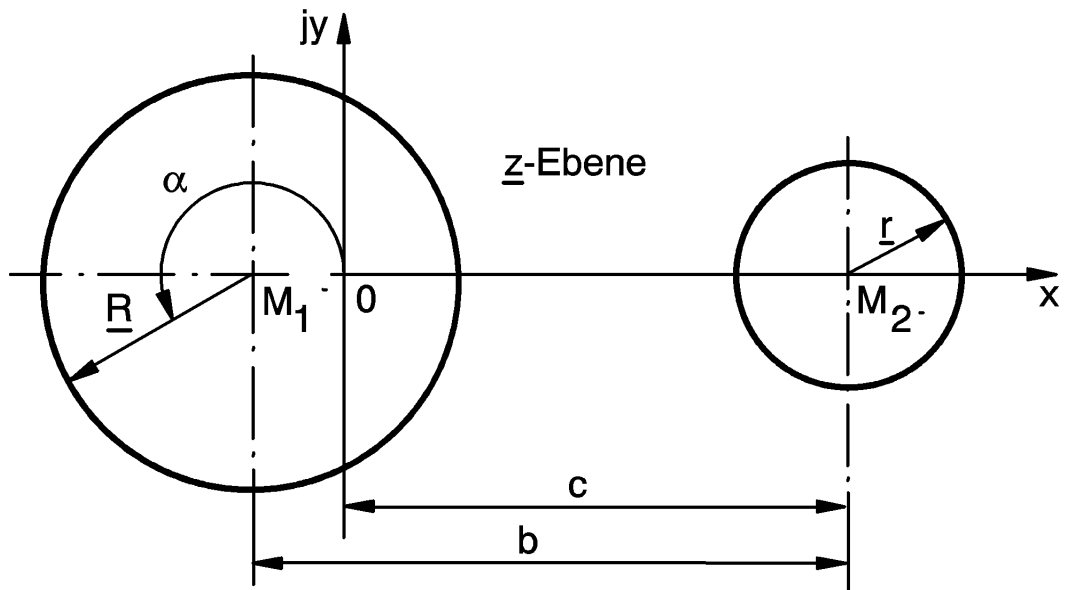


Bild 4.1.2.1
Elektrodensystem Walze-Zylinder in der \underline{z} -Ebene

2. Schritt

Die feldbeschreibenden geometrischen und elektrischen Größen werden für die Kondensatoranordnung (Bild 4.1.2.2) in der komplexen \underline{w} -Ebene mit $\underline{w} = u + jv$ berechnet.

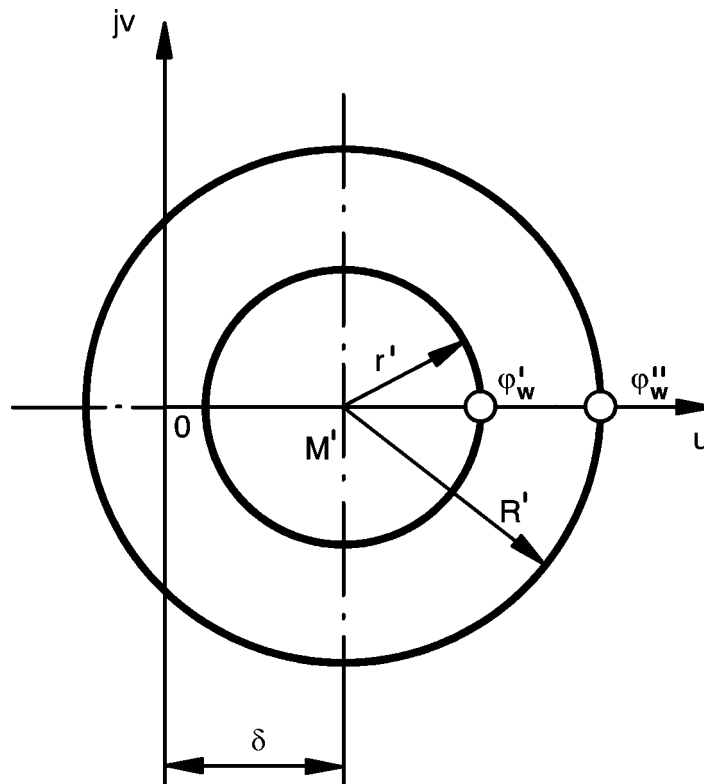


Bild 4.1.2.2
Zylinderkondensatoranordnung in der \underline{w} -Ebene

3. Schritt

Die Rücktransformation der Feldgrößen vom Bildbereich der komplexen \underline{w} -Ebene in den Originalbereich der komplexen \underline{z} -Ebene liefert das gewünschte *elektrische Feld des Elektrodensystems Walze-Zylinder*.

Die geometrischen Größen des Zylinderkondensators ergeben sich zu:

$$r' = \frac{r}{c^2 - r^2} \quad R' = - \frac{R}{(b - c)^2 - R^2}$$

Da die beiden Elektrodenmittelpunkte $M1$ und $M2$ in den Mittelpunkt M' übergehen, folgt:

$$\delta = \frac{c - b}{(b - c)^2 - R^2} = \frac{c}{c^2 - r^2}$$

Aus dieser Gleichung wird der Abstand c in der \underline{z} -Ebene bestimmt:

$$c_{1,2} = \frac{r^2 + b^2 - R^2}{2b} \pm \sqrt{\left(\frac{r^2 + b^2 - R^2}{2b}\right)^2 - r^2}$$

Die Zusatzbedingungen $c_{1,2} > 0$ und $c_{1,2} > r$ sind nur für die positive Wurzel erfüllt. Für die Spannung U_{12} der Bildanordnung gilt dann:

$$U_{12} = \varphi(\underline{w}) - \varphi'(\underline{w}) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{R'}{r'}$$

Im Bildbereich $r' < (\underline{w} - \delta) < R'$ folgt für das komplexe Potenzial $\underline{n}(\underline{w})$:

$$\underline{\varphi}(\underline{w}) = \operatorname{Re}\{\underline{\varphi}(\underline{w})\} + j \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}(\underline{w})\} = - \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \ln(\underline{w} - \delta) + K$$

Mit $\underline{w} = u + jv$ und K als komplexe Konstante.

Zwischen dem komplexen Potenzial $\underline{n}(\underline{w})$ und der konjugiert komplexen elektrischen Feldstärke $\underline{E}^*(\underline{z})$ einer beliebigen *Originalanordnung* gilt nach Prinz [45] die Gleichung:

$$\underline{E}^*(\underline{z}) = E_x - j E_y = j \cdot \frac{d\varphi(\underline{w})}{d\underline{w}} \cdot \frac{d\underline{w}}{d\underline{z}}$$

Für das betrachtete Elektrodensystem aus *Walze und Zylinder* lautet diese Gleichung:

$$\underline{E}^*(z) = j \frac{Q}{2 \pi \varepsilon_0 l} \frac{1}{z - \delta z^2}$$

Mit der Beziehung
$$\frac{Q}{2 \pi \varepsilon_0 l} = \frac{U_{12}}{\ln \frac{R'}{r'}}$$

nimmt die komplexe elektrische Feldstärke $\underline{E}(z)$ den endgültigen Ausdruck an:

$$\underline{E}(z) = E_x + jE_y = \frac{U_{12}}{\ln \frac{R'}{r'}} \left(\frac{1}{j(\delta z^2 - z)} \right)^*$$

4.1.3 Eigener Ansatz zur Berechnung der elektrischen Kornladung

Zur Berechnung der elektrischen Kornladung $Q_p(t)$ aus den Ladungszuständen $Q_{p0}(t_0)$ und $Q_{pB}(t_B)$ wird eine Exponentialfunktion angesetzt. Der Graph dieser Funktion ist in Bild 4.1.3.1 dargestellt.

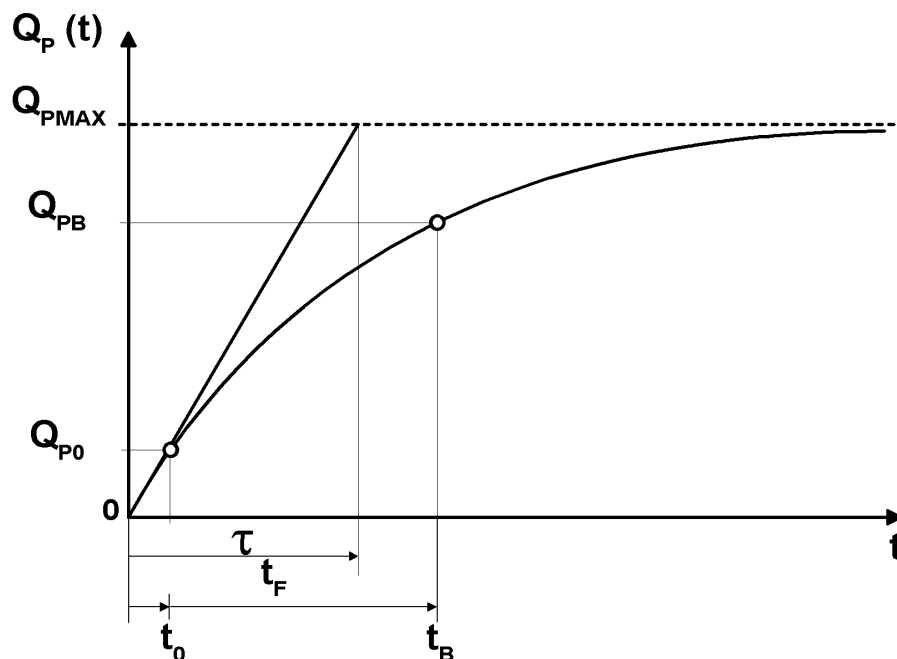


Bild 4.1.3.1
Elektrische Kornladung Q_p als Funktion der Zeit t

Der Zeit t ist die Kornladung Q_p wie folgt zugeordnet:

- Zeit t_0 : Aufgabe eines Kornes auf die Walze mit der Anfangsladung Q_{P0}
- Zeit t_B : Auffangen eines Kornes mit der Ladung Q_{PB} .

Nach sehr langer Zeit wird die stationäre positive Endladung Q_{PMAX} erreicht. J ist die Zeitkonstante des Ladevorganges, t_F die Aufenthaltsdauer eines Kornes im Trennraum.

4.1.3.1 Berechnung der Ladung als Funktion der Zeit

Bei der Aufgabe hat ein Korn die Anfangsladung Q_{P0} :

$$Q_{P0} = Q_{PMAX} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \right)$$

Am Ausgang des Trennraumes beträgt die Kornladung Q_{PB} :

$$Q_{PB} = Q_{PMAX} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_B}{\tau}} \right) = Q_{PMAX} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \cdot e^{-\frac{t_F}{\tau}} \right)$$

Aus beiden Gleichungen berechnet sich die Zeitkonstante J zu:

$$\tau = \frac{t_F}{\ln \frac{Q_{PMAX} - Q_{P0}}{Q_{PMAX} - Q_{PB}}}$$

Für Zeiten t , $[t_0; t_B]$ gilt für die Ladung $Q_P(t)$:

$$Q_P(t) = Q_{PMAX} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Nach Einsetzen der Beziehung für die Zeitkonstante J und anschließender Umformung folgt:

$$Q_P(t) = Q_{PMAX} - (Q_{PMAX} - Q_{P0}) \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_F}} \right)^{\ln \frac{Q_{PMAX} - Q_{P0}}{Q_{PMAX} - Q_{PB}}}$$

Im Falle negativer Ladungen Q_{PB} , ist Q_{PMAX} durch $Q_{PMIN} = -Q_{PMAX}$ zu ersetzen.

Würden Anfangsladung Q_{P0} , Endladung Q_{PB} und Aufenthaltsdauer t_F unter Betriebsbedingungen *experimentell* bestimmt, so fehlte zur Vollständigkeit dieses Ansatzes noch die stationäre Endladung Q_{PMAX} .

Es gilt:

$$Q_{PMAX} = K_S \cdot d_p^2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot E_D$$

Mit:

K_S : Faktor, der die Korneigenschaften berücksichtigt; d_p : Teilchendurchmesser

E_D : Durchschlagfeldstärke der Luft; ϵ_0 : Feldkonstante

Die Durchschlagfeldstärke E_D der Luft wird nachfolgend bestimmt.

4.1.3.2 Bestimmung der Durchschlagfeldstärke

Die Durchschlagfeldstärke E_D der Luft im Trennraum hängt ab von

- Luftdruck, Lufttemperatur, absoluter Luftfeuchte und dem
- Elektrodensystem des Walzenscheiders.

Diese Abhängigkeiten werden folgendermaßen berücksichtigt:

$$E_D = E_{D0} \cdot K$$

E_{D0} : Durchschlagfeldstärke unter Bezugsbedingungen
 K : Korrekturfaktor, der Abweichungen von den Bezugsbedingungen berücksichtigt.

$$K = \frac{K_D \cdot K_{EW}}{K_\phi}$$

Der Korrekturfaktor K ist aus den Korrekturfaktoren K_D für Druck und Temperatur der Luft, K_n für die absolute Feuchte der Luft und K_{EW} für das Elektrodensystem des Walzenscheiders zusammengesetzt.

Die Korrekturfaktoren K_D , K_n und K_{EW} werden nachfolgend angegeben.

Korrekturfaktor K_D für Druck und Temperatur der Luft

Die Bezugsbedingungen tragen den Index N. Diese Bedingungen sind:

Bezugstemperatur T_{LN} : $T_{LN} = T_0 + \Delta T_{LN}$; $T_0 = 273,16 \text{ K}$; $\Delta T_{LN} = 20 \text{ K}$

Bezugsdruck p_{LN} : $p_{LN} = 101,325 \text{ kPa}$

Für den Korrekturfaktor K_D gilt:

$$K_D = \varrho_r = \frac{\varrho_L}{\varrho_{LN}} = \frac{\frac{m_L}{V_L}}{\frac{m_{LN}}{V_{LN}}} = \frac{p_L}{p_{LN}} \cdot \frac{T_{LN}}{T_L}$$

k_r : relative Dichte der Luft; m_L : Masse der Luft; T_L : Absolute Temperatur der Luft;
 k_L : Dichte der Luft im Betrieb; V_L : Volumen der Luft;
 k_{LN} : Dichte der Luft unter Be- p_L : Luftdruck;
 zugsbedingungen;

Korrekturfaktor K_n für die absolute Feuchte der Luft

Die Bezugsbedingungen *Druck* p_{LN} und *absolute Temperatur* T_{LN} der Luft werden nun um die weitere Bezugsbedingung absolute Feuchte $n_{LABSN} = 11 \text{ g/m}^3$ der Luft erweitert. Für den Korrekturfaktor K_n , der den Einfluss der Luftfeuchte auf die Durchschlagfeldstärke berücksichtigt, gilt nach VDE 0432 Teil 1/8.1991 [48]:

$$K_\phi = 1 + 0,014 \cdot \left(\frac{\phi_{LABS}}{K_D} - \phi_{LABSN} \right)$$

n_{LABS} : Absolute Feuchte der Luft während der Versuchsdauer; $[n_{LABS}] = \text{g/m}^3$

Werden Lufttemperatur h_L und relative Luftfeuchte n während der Versuchsdauer gemessen, so ergibt sich die absolute Luftfeuchte n_{LABS} zu:

$\phi_{LABS} = \phi \cdot \phi_{LMAX}$; mit n_{LMAX} : absolute Feuchte der gesättigten Luft

$$\phi_{LMAX} = \frac{p_{sw}}{R_w \cdot (\vartheta_L + 273,16)}; \quad p_{sw} = e^{\left(23,62 - \frac{4064,95}{\vartheta_L + 236,25} \right)} \cdot Pa$$

p_{sw} : Sättigungsdruck von Wasser; $[p_{sw}] = Pa$; h_L : Lufttemperatur; $[h_L] = \text{K}$

R_w : spezielle Gaskonstante von Wasserdampf mit $R_w = 0,461 \text{ kJ/(kg K)}$

Korrekturfaktor K_{EW} für das Elektrodensystem

Die atmosphärischen Bezugsgrößen sind: T_{LN} , p_{LN} und n_{LABSN} . Bezugsgröße des inhomogenen, quasielektrostatischen Walzenscheiderfeldes ist der Betrag der mittleren elektrischen Feldstärke E_{MI} .

$$E_{MI} = \frac{U_{12}}{b - (R + r)} \quad \begin{array}{l} U_{12} : \text{Elektrodenspannung} \\ b - (R + r) : \text{Elektrodenabstand} \end{array}$$

(Bild 4.1.2.1)

Der Korrekturfaktor K_{EW} ist als Verhältnis der Beträge von mittlerer Feldstärke E_{MI} und maximaler Feldstärke E_{MAX} definiert.

E_{MAX} tritt an der Zylinderelektrode ($z = c - R$) auf, d. h.

$$E_{MAX} = \frac{U_{12}}{\ln \frac{R'}{r'}} \left| \left[\frac{-j}{\delta (c - R)^2 - (c - R)} \right]^* \right|$$

Für K_{EW} gilt dann:
$$K_{EW} = \frac{E_{MI}}{E_{MAX}} = \ln \frac{R'}{r'} \cdot \frac{|\delta (c - R)^2 - (c - R)|}{b - (R + r)}$$

4.1.4 Numerische Lösung des Problems der Kornbewegung

Das kinetische Teilchenverhalten lässt sich durch Gleichungen der Form beschreiben:

$$\vec{d} = \vec{b} \cdot \ddot{\vec{x}} \quad \text{mit } \vec{d} \text{ als Kraft oder Moment und } \vec{b} \text{ als Konstante}$$

Die berechnete Annahme, dass \vec{d} in dem kleinen wählbaren Zeitintervall Δt konstant bleibt, führt nach numerischer Integration zu Ergebnissen der Form:

$$\dot{\vec{x}} = \dot{\vec{x}}_0 + \ddot{\vec{x}} \cdot \Delta t \quad \text{und} \quad \vec{x} = \vec{x}_0 + \dot{\vec{x}}_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \ddot{\vec{x}} \cdot (\Delta t)^2$$

Dem Anfang eines Zeitintervalls Δt ist der \vec{x} -Wert mit dem Index 0 zugeordnet. Der \vec{x} -Wert am Ende des Zeitintervalls Δt trägt keinen Index.

Beim Übergang vom Rutschen zum Rollen weist die Normalkraft für $(d^2x/dt^2) = \text{const.}$ einen Sprung auf. In diesem besonderen Fall ist Δt so zu berechnen, dass der Übergang Rutschen \rightarrow Rollen genau am Ende des Zeitintervalls erfolgt.

Dann gilt:

$$R \cdot \omega = (R + r_p) \cdot \dot{\phi} - r_p \cdot \dot{\phi}_p \quad \text{und} \quad \dot{\phi}_p - \dot{\phi}_{p0} = - \frac{\vec{F}_K^T \cdot \vec{r}_p}{\theta_p} \cdot \Delta t$$

\vec{F}_K^T wird zu Beginn aus Gleichungen des Abschnitts 4.1.1 bestimmt:

$$\vec{F}_K^T = - \mu [F_s^N + m (R + r_p) \dot{\phi}^2] \text{sgn}[R \omega + r_p \dot{\phi}_p - (R + r_p) \dot{\phi}]$$

$$\dot{\phi} - \dot{\phi}_0 = \frac{\vec{F}_K^T + \vec{F}_s^T}{(R + r_p) \cdot m} \cdot \Delta t$$

Ferner gilt:

$$R \cdot \omega = (R + r_p) \left(\dot{\phi}_0 + \frac{\vec{F}_K^T + \vec{F}_s^T}{(R + r_p) m} \Delta t \right) - r_p \left(\dot{\phi}_{p0} - \frac{\vec{F}_K^T \cdot \vec{r}_p}{\theta_p} \Delta t \right)$$

Damit folgt für das Zeitintervall Δt :

$$\Delta t = \frac{R \cdot \omega - (R + r_P) \cdot \Phi_0 + r_P \cdot \Phi_{P0}}{\frac{F_K^T + F_S^T}{m} + \frac{F_K^T \cdot r_P^2}{\theta_P}}$$

Dieses Zeitintervall ist für die Berechnung anzusetzen. Nach Ablauf des Zeitintervalls rollt das Korn wieder. Die numerische Berechnung berücksichtigt zusätzlich folgende Wechsel der Teilchenbewegung:

a) Abheben des Kornes von der Walze: $F_K^T < 0$

b) Auftreffen des Kornes auf die Walze

Die Tangentialgeschwindigkeit des Kornes bleibt erhalten.

c) Übergang vom Rollen zum Rutschen auf der Walze:

$$|F_K^T| > |\mu_0 \cdot F_K^N| \quad \text{und danach:} \quad F_K^T = \mu \cdot F_K^N \cdot \text{sgn}(F_K^T)$$

μ_0 : statischer Reibbeiwert; μ : dynamischer Reibbeiwert; **sgn**: Signum

Die im Abschnitt 4.1 angestellten neuen und umfassenderen Betrachtungen zur Bewegung von Teilchen im Trennraum eines Walzenscheiders mit Zylinderelektrode bilden die Basis der numerischen Berechnungen der Bahnkurven und deren Darstellung. Für die numerische Berechnung der Flugbahnen wurde das *Fortran*programm P1 "Bebahn.for" - für deren graphische Darstellung die "Excel Auswertungsoberfläche" P2 [49] entwickelt. Die Berechnung von Flugbahnen mit dem neuen Rechenmodell wird im Abschnitt 7 behandelt.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen erfolgen mit Hilfe einer eigens erstellten Versuchsanlage, in der stoffliche, geometrische und betriebsbedingte Einflussgrößen hinreichend verändert werden können. In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Versuchsanlage vorgestellt.

4.2.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist in Bild 4.2.1.1 mit ihren Teilsystemen *Walzenscheider*, *Hochspannungsanlage*, *Klimakammer* und *Klimaanlage* sowie *Messwerterfassung* und *Datenverarbeitung* dargestellt - sie werden nachfolgend beschrieben.

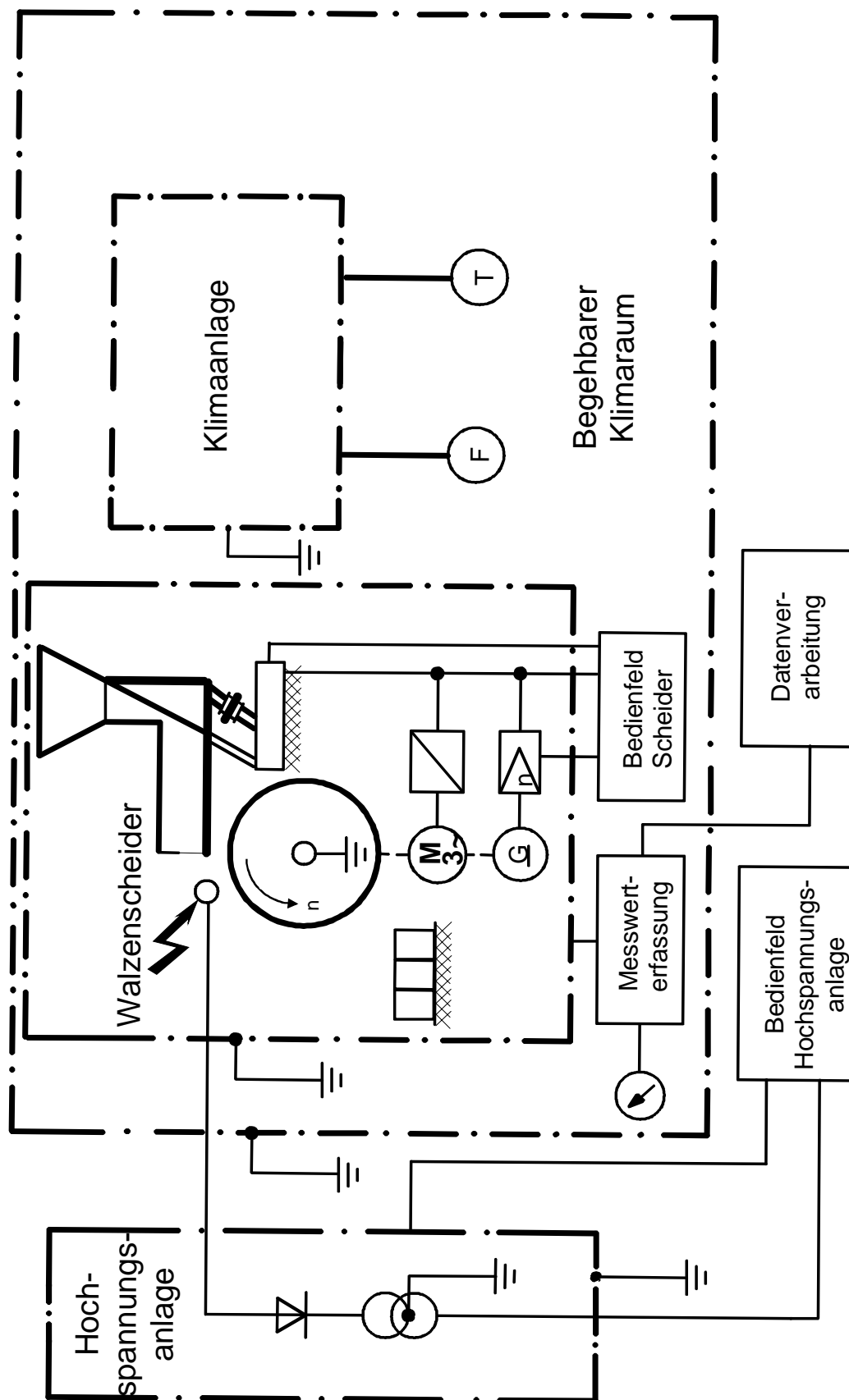


Bild 4.2.1.1
Aufbau der Versuchsanlage

4.2.1.1 Walzenscheider

Das Schema des selbst gefertigten Walzenscheiders zeigt Bild 4.2.1.1.1. Das Versuchsgut wird über einen Trichter und eine Schwingrinne auf die Walze aufgegeben. Trichter, Rinne und Walze sind aus rost- und säurebeständigem Stahl hergestellt, die Walzenoberfläche ist poliert.

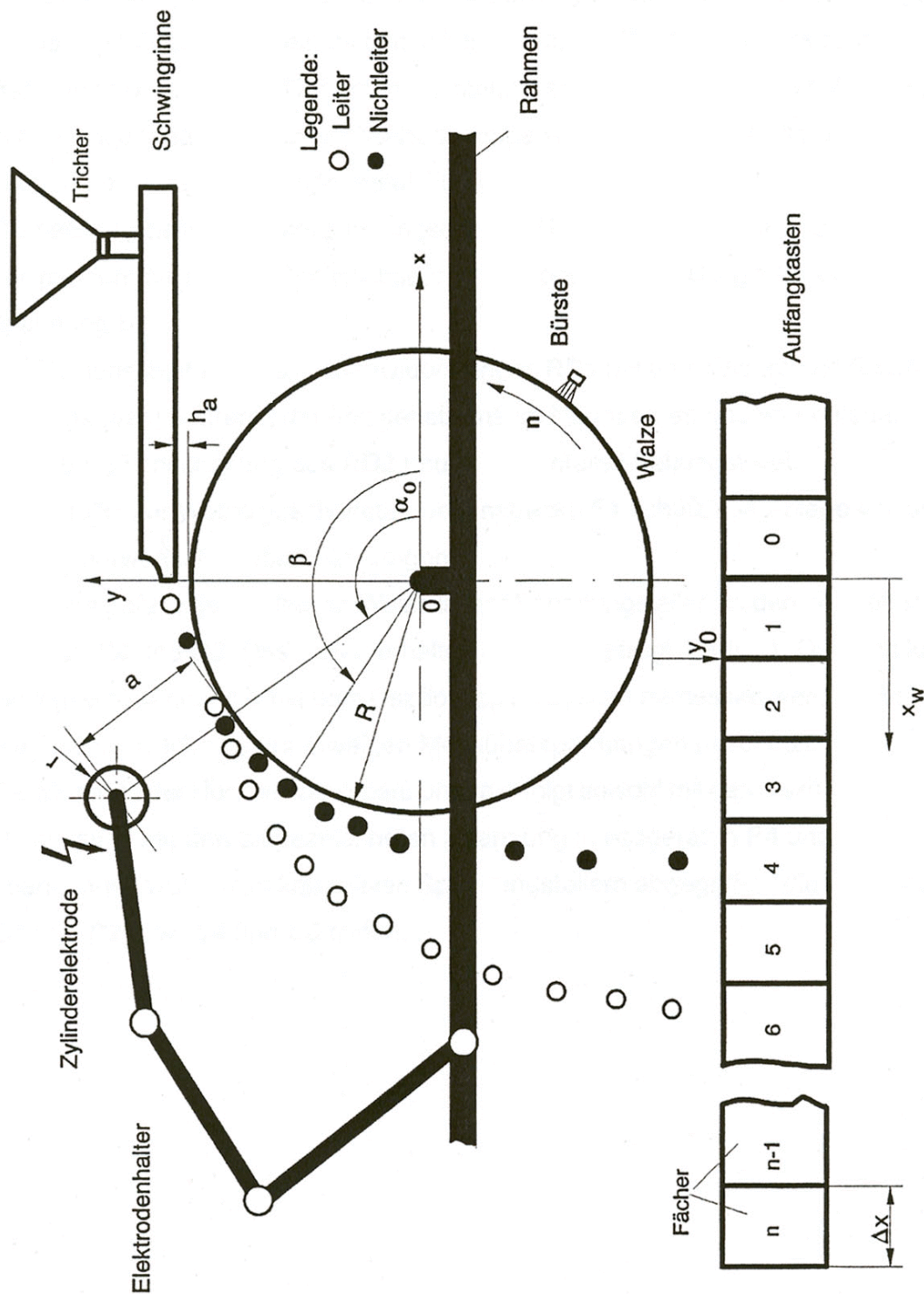


Bild 4.2.1.1.1
Schema des Laboratoriumwalzenscheiders

Ein drehzahl geregelter, fremdbelüfteter Drehstrommotor mit Wechselrichter treibt die Walze über einen Riementrieb an. Die Drehzahl n der Walze lässt sich im Bereich n , $[0;500] \text{ min}^{-1}$ regeln.

Unterhalb der Walze ist ein Auffangkasten aus Hart-PVC horizontal angeordnet, in dem sich die abgeworfenen Körner sammeln. Der Kasten kann mittels herausnehmbarer Trennbleche in maximal 40 gleiche Trennfächer von jeweils $x = 20 \text{ mm}$ Fächerbreite unterteilt werden. Damit sind sowohl Wurfweite x_w als auch Massenverteilung $m(x_w)$ feinstufig zu erfassen.

Die im hinteren Walzenbereich angebrachte Bürste reinigt die Walze von anhaftenden Reststoffen.

Das Elektrodensystem besteht aus der geerdeten Walze und einer Rohrelektrode. Die Rohrelektrode hat den Außendurchmesser $d = 30 \text{ mm}$. Sie wurde aus Messing gefertigt. Ein verstellbarer Elektrodenhalter aus Hart-PVC trägt die Rohrelektrode. Dadurch kann die Winkelstellung θ der Elektrode und der Abstand a zwischen Rohrelektrode und Walze variiert werden. Die Rohrelektrode ist über ein Elektrofilterkabel (ELCUFILT 111 kV, zwei Endverschlüsse) an die Hochspannungsanlage angeschlossen - die Walze über eine eindrätige Gummi-Schlauchleitung.

4.2.1.2 Hochspannungsanlage

Die Hochspannungsanlage, die Gleichspannungen U , $[0;70] \text{ kV}$ bereitstellen kann, wurde unter Nutzung von Laboratoriumsbeständen entwickelt. Der Anlagenaufbau geht aus dem Schaltbild 4.2.1.2.1 hervor.

Das Elektrodensystem ist als Impedanz Z dargestellt. Es wird mit Hochgleichspannung U aus einer Zweipulsmittelpunktschaltung versorgt. Die beiden Hochspannungsprüftransformatoren **T1** und **T2** formen die steuerbare Wechselspannung U_{12} , $[0;230] \text{ V}$ in zwei gegenphasige Hochwechselspannungen um. Die Scheitelwerte dieser Spannungen sind mit dem Stelltransformator **T3** aneinander anzupassen.

Die nach geschalteten Hochspannungsdioden **V1** und **V2** richten die angepassten Wechselspannungen gleich. Der Hochspannungskondensator **C5** glättet die Hochgleichspannung U . Die Reihenschaltung des Diodenwiderstandes **RD1** mit dem Widerstand **R1** im oberen Leitungszweig begrenzt die Anlagenströme im Nennbetrieb und im Fehlerfall ebenso wie die Reihenschaltung aus **RD2** und **R2** im unteren Leitungszweig. Die parallel zur Walze geschaltete Funkenstrecke **F1** schützt die Anlage vor Schäden durch unerwünschte Überspannungen.



Ebenfalls parallel geschaltet zur Walze ist der Spannungsteiler mit den ohmschen Widerständen **R4** und **R3**. Das Teilverhältnis **R4 : R3** beträgt **1000 : 1**. Dadurch kann die Hochgleichspannung **U** mit dem Oszilloskop **P1** indirekt gemessen werden. **P1** ist durch die Funkenstrecke **F2** vor etwaigen Messüberspannungen geschützt.

Die Messung der Hochwechselspannungen erfolgt sowohl mit den Oszilloskopen **P2** und **P3** als auch mit den eingezeichneten Spannungsmessgeräten **P4** und **P5**. Die Messspannungen werden an kapazitiven Spannungsteilern abgegriffen, welche die Kapazitäten **C1** und **C2** bzw. **C4** und **C3** bilden.

4.2.1.3 Klimakammer und Klimaanlage

Wegen des Einflusses, den Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Feuchtigkeit des Versuchsgutes auf den Trennvorgang haben, werden alle Versuche in einer begehbaren *Klimakammer* mit **15,5 m³** Rauminhalt durchgeführt.

In der Kammer ist die Temperatur **h** im Bereich **h, (15;40) °C** und die relative Feuchte **n** im Bereich **n, (30;90) %** regelbar. Die zulässige Regelabweichung beträgt laut Herstellerangabe für die Temperatur **± 1 K** und für die relative Feuchte **± 2 %**.

Zur Raumklimatisierung dient eine *Klimaanlage*, die mit Umluft nach dem Prinzip der Taupunkttemperaturregelung arbeitet.

Der direkten Luftbehandlung durch Heizen bzw. Kühlen, Befeuchten bzw. Entfeuchten dienen

- *die Elektroheizung*
(Nennleistung **P_n = 2,4 kW**, Nennspannung **U_n = 230 V**),
- *die Kompressionskälteanlage* (Kälteleistung von **2,5 kW** bei **VT 10**) und
- *der Wasserzerstäuber*.

In Verbindung mit dem *Regelgerät* (Typ HTF 3) werden Temperatur und relative Feuchte innerhalb der angegebenen Grenzen geregelt.

4.2.1.4 Erfassung und Verarbeitung der Messwerte

Zur Prozessbeschreibung werden die

- *klimatischen Größen*,
- *mechanischen Größen* und
- *elektrischen Größen*

gemessen.

a) Messung der klimatischen Einflussgrößen

Die Temperatur ***h*** und die relative Luftfeuchte ***n*** werden im Klimaraum mit folgenden Geräten gemessen und angezeigt:

- *Thermometer und Haarhygrometer* mit Analoganzeige, integriert im Regelgerät
- *Thermometer und Hygrometer* mit Digitalanzeige

Ein Trommelschreiber zeichnet neben der Temperatur ***h*** und der relativen Luftfeuchte ***n*** auch den Luftdruck ***p*** im Klimaraum kontinuierlich auf.

b) Messung der mechanischen Einflussgrößen

Die Walzendrehzahl ***n*** wird vor jedem Versuch durch die Vorgabe des Drehzahlsollwertes festgelegt. Die Drehzahlkontrolle erfolgt

- *bei Versuchsbeginn* mit einem Handtachometer
- *kontinuierlich während der Versuchsdauer* mit dem Messgerät DVM 199, das in das Bedienfeld des Walzenscheiders eingebaut ist.

c) Messung der elektrischen Einflussgrößen

Es werden die betrieblichen elektrischen Einflussgrößen

*Hochgleichspannung ***U*** und
Kornladung ***Q*** gemessen.*

Messung der Hochgleichspannung *U*

Die Hochgleichspannung ***U*** der Hochspannungsanlage ist mit dem Oszilloskop ***P1*** kontinuierlich zu messen. Für Kontrollmessungen wird ein Elektrometer (Typ: 610 C) mit Teiler (Modell 6103 B, Teilverhältnis 1000 : 1) der Firma Keithley eingesetzt.

Messung der elektrischen Kornladung *Q*

Um das Verhalten der Kornladungen für geringe Ladungswerte ***Q*** ***g***(-10^{-9} ; 10^{-9}) ***As*** in der Nähe starker elektrischer Felder zu messen, wurde eigens eine Ladungsmesseinrichtung entwickelt. Diese Einrichtung setzt sich aus sechs gleichartigen Messketten zusammen, deren Schaltschema in Bild 4.2.1.4.1 dargestellt ist.

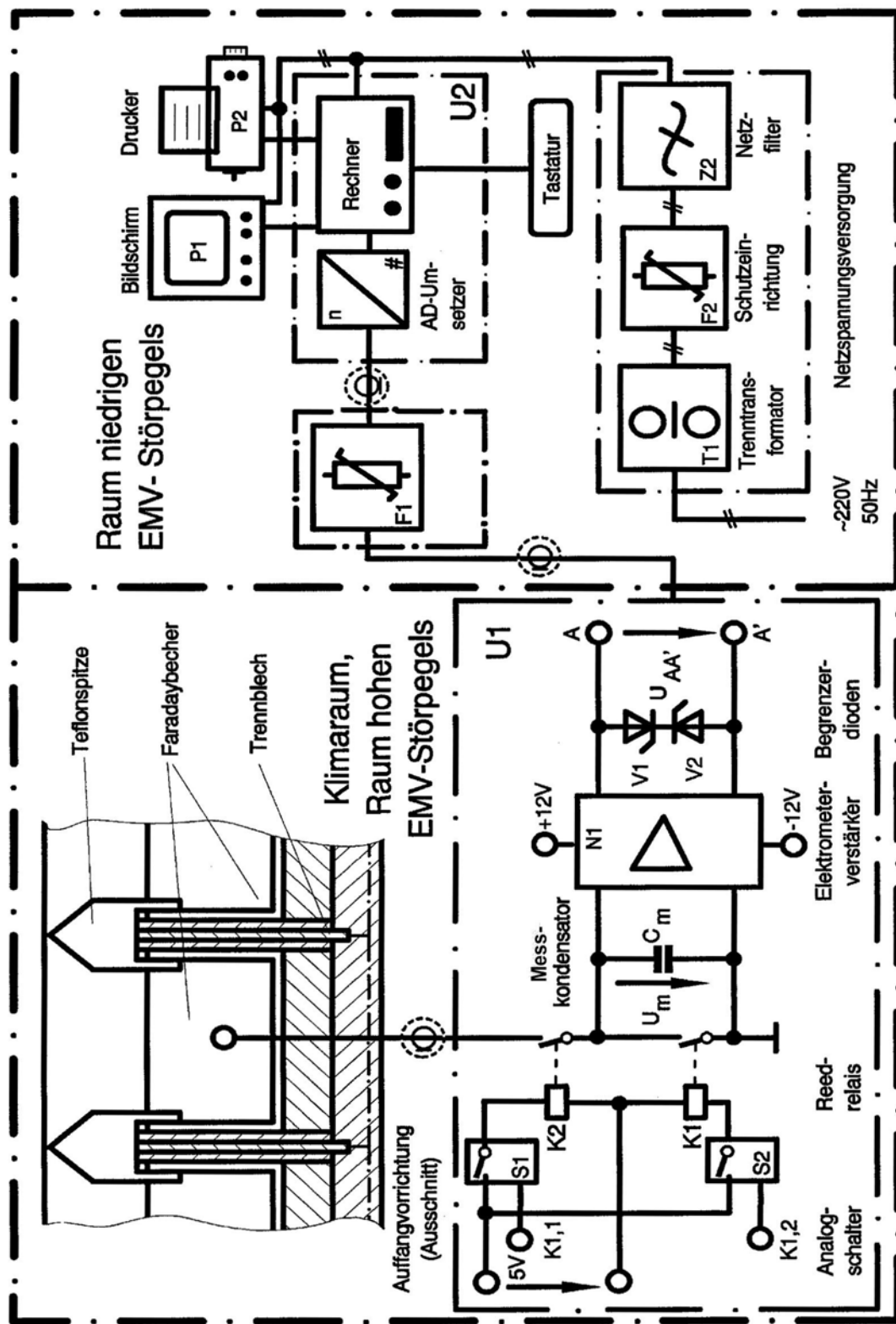


Bild 4.2.1.4.1
Aufbau der Ladungsmesseinrichtung

Jede Messkette besteht aus dem *Messfühler* und dem rechnergesteuerten *Messmodul*, das über den Analog-Digital-Umsetzer (AD-Umsetzer) mit dem Rechner und dessen Peripherie verbunden ist.

Der Messfühleraufbau

Die *Messfühler* sind so ausgelegt, dass sie in jedes Fach des Auffangkastens passen. Sie bestehen aus *gekürzten V2A-Trennblechen* mit *beidseitiger Teflonfolienisolierung*, herausnehmbaren *Faradaybechern* auf verschraubten *Hart-PVC-Stützen* und *Teflonspitzen*, wie im Bild 4.2.1.4.2 schematisch dargestellt.

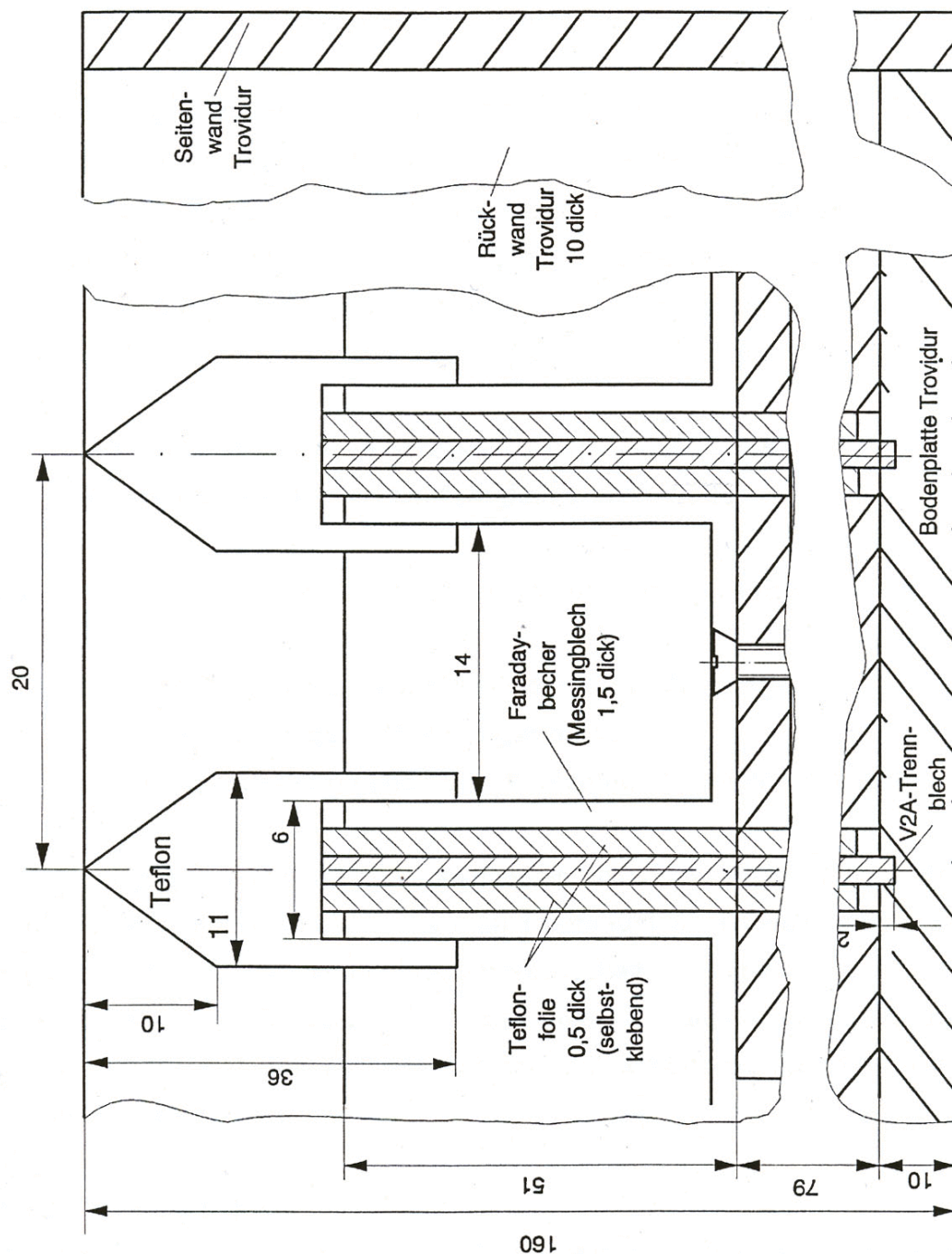


Bild 4.2.1.4.2
Schematische Darstellung eines Ladungsmessfühlers

Jedes gekürzte V2A-Trennblech trägt eine aufgesetzte Teflonspitze, die jeweils die Trennblechoberkante und zwei Wände benachbarter Faradaybecher abdeckt. Damit wird erreicht, dass

- *keine Körner zwischen Becherwand und Trennblech fallen*
- *alle Fächer des Auffangkastens in Bezug auf Oberkantenhöhe und oberer Breite übereinstimmen*
- *das äußere elektrische Feld nicht über die Becher in das Messsystem einkoppelt.*

Die gekürzten Trennbleche sind leitend miteinander verbunden - sie bilden das elektrische Bezugspotenzial des Messsystems. Der Anschluss der Faradaybecher an die Messmodule erfolgt jeweils über Steckvorrichtungen mit Koaxialleitungen.

Messprinzip und Messmodulaufbau

Der Messung liegt folgendes Prinzip zugrunde:

Fallen geladene Körner in einen Faradaybecher, so influenzieren die Kornladungen entsprechende Gegenladungen in den Messingwänden dieses Bechers. Können die ungebundenen Influenzladungen Q nur über einen Messkondensator bekannter Kapazität C_m zur elektrischen Bezugsmasse abfließen, so speichert der Kondensator diese Ladungen. Aus dem zeitlichen Verlauf der Messgröße Kondensatorspannung $u_m(t)$ wird der Kornladungsverlauf $Q(t)$ nach folgender Gleichung bestimmt:

$$Q(t) = C_m \cdot u_m(t)$$

Die Ladungen dürfen nicht unter Umgehung des Messkondensators abfließen, deshalb muss auf hochwertige Messkreisisolation mit Isolationswiderständen $R_{is} > 10^{13} \Omega$ und sorgfältige Messleitungsverlegung geachtet werden.

Die Messspannung u_m ist Eingangsspannung des Elektrometerverstärkers **N1**, der als Impedanzwandler einen hohen Eingangswiderstand und einen kleinen Ausgangsinnenwiderstand aufweist. Der Verstärkungsfaktor beträgt 1 - Eingangsspannung u_m und Ausgangsspannung u_{AA} stimmen daher überein.

Die analoge Ausgangsspannung u_{AA} wird dann von einem Analog-Digital-Umsetzer digitalisiert und anschließend mit dem *eigens entwickelten Basicprogramm [P3] "BEMESS"* vom Rechner verarbeitet. Dieses eigene Programm steuert über die Analogschalter **S1** und **S2** die Reedrelais **K1** und **K2**. Der jeweilige Messbereich einer Messkette stellt sich in Abhängigkeit von der Becherladung fließend nach folgendem Steuerschema innerhalb der wählbaren Messdauer ein:

Start:

S1 und **S2** geschlossen, also **K1** und **K2** angezogen, Faradaybecher und Verstärkereingang haben das Potenzial der elektrischen Bezugsmasse und sind ladungsfrei.

1. Schritt:

S2 öffnet, **K2** fällt ab.

2. Schritt:

Die einfallende Kornladung sorgt für die Kondensatorladung Q_1 . Bildschirmdarstellung von $Q_1(t)$ und Speicherung der Messdaten. Bei Erreichen der Kondensatorspannung $u_m(t_1) = 5 \text{ V}$ öffnet **S1** und **S2** schließt, d. h. **K1** fällt ab, während **K2** anzieht. Der Messkondensator wird innerhalb kürzester Zeit vollkommen entladen.

3. Schritt:

S2 öffnet, **K2** fällt ab.

4. Schritt:

S1 schließt, **K1** zieht an. Die Kornladung sorgt für die Kondensatorladung Q_2 . Bildschirmdarstellung von $Q_1(t)$ plus $Q_2(t)$ und Speicherung der Messdaten.

Ende:

Nach Ablauf der gewählten Messdauer ist das zeitliche Kornladungsverhalten in den sechs Messketten erfasst - alle Daten sind endgültig speicherbar.

Die Ladungsmesseinrichtung ist vor betriebsbedingten Störspannungen zusätzlich geschützt. Dazu sind die zwischen Messmodul und Rechner verlegten Leitungen, die Bereiche hohen Störpegels mit Bereichen niedrigen Störpegels der elektromagnetischen Verträglichkeit (**EMV**) verbinden, mit Varistoren (**F1**) beschaltet.

Die Netzspannungsversorgung übernimmt der Trenntransformator (**T1**), dem die Schutz-einrichtung (**F2**) und das Netzfilter (**Z2**) nach geschaltet sind.

4.2.2 Versuche

Die Durchführung der Versuche erfolgt in zwei grundsätzlichen Schritten. Im ersten Schritt werden Versuche mit *Quarz* zur Trennung nach der Teilchenmasse m bzw. nach Unterschieden in der Korngröße d_p unternommen.

Der zweite Schritt befasst sich mit der *Trennung zerkleinerter Leitungsschrotte*, welche die Wertstoffanteile Polyvinylchlorid (PVC) und Kupfer (Cu) enthalten.

Nach dem Trennvorgang sollten PVC und Cu möglichst sortenrein vorliegen, um sie weiteren Produktionsprozessen zuführen zu können. Ein denkbarer Prozess wäre die „Herstellung neuer elektrischer Leitungen“. Aufbereitung und Wiederverwendung bereits

benutzter Rohstoffe („Recycling“) erfordern in diesem Fall hochreine Stoffe. Bereits unerwünschte, geringste Verunreinigen führen zur starken Abnahme

- *des hohen Isolationswiderstandes der PVC-Isolation und*
- *der hohen elektrischen Leitfähigkeit der Cu-Leiter.*

Die Trennversuche mit Quarz dienen der grundsätzlichen Orientierung wie

- *dem Test der Leistungsfähigkeit der Versuchsanlage,*
- *dem Gewinnen eigener Trennergebnisse*
- *dem Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen von Schautes [43].*

Die bisherigen Erkenntnisse zum elektrischen Ladungsverhalten und zur Bewegung von Teilchen mit rundlicher Kornform im Trennraum, ließen sich durch die eigenen Erweiterungen von Theorie und Praxis wissenschaftlich verfeinern.

Erkenntnisse der mit Quarz durchgeführten Versuche könnten dann als Beurteilungsgrundlage zur Stofftrennung von Gemischen, wie z. B. Leitungsschrotten, in ihre Komponenten dienen.

4.2.2.1 Versuchsstoffe

Die Versuche werden mit Quarz, Polyvinylchlorid (PVC) und Kupfer (Cu) durchgeführt. Quarz eignet sich als neutraler, homogener Stoff gut für die vorgesehenen Grundlagenuntersuchungen. Quarz soll in Anlehnung an die Experimente von Schautes in der Kornklasse **0,2 mm # d_{PQ} # 0,315 mm** untersucht werden. Quarz mit der Bezeichnung „Glassand Nr. 8 a“ (SiO₂ - Anteil 98%, Dichte **D_Q = 2,63 kg/dm³**) lieferten die Amberger Kaolinwerke GmbH, Hirschau.

Zerkleinerter Leitungsschrott liegt als Gemisch der Stoffe PVC und Cu vor. Die Leitungsschrotte, bestehend aus

- PVC (**D_{PVC} = 1,38 kg/dm³** und
- Cu (**D_{CU} = 8,96 kg/dm³**),

stellte das Wuppertaler Kabelwerk Rheinshagen bereit. Der Leitungshersteller hat elektrische Leitungen des Typs H03V-F2,5br mit einer Schneidmühle zerkleinert und anschließend auf **2 mm # d_P # 5 mm** gesiebt.

Kornform sowie Mikrostruktur und Fremdstoffanteile der Kornoberfläche haben sowohl auf das Ladungs- als auch auf das Reibungsverhalten der Versuchsstoffe und damit auf

auf das *Ladungs-* als auch auf das *Reibungsverhalten* der Versuchsstoffe und damit auf die Versuchsergebnisse Einfluss. Deshalb wurden Quarz, Polyvinylchlorid (PVC) und Kupfer (Cu) im Fachgebiet „Werkstoffkunde“ der Universität Essen elektronenmikroskopisch untersucht. Repräsentative Ergebnisse dieser Untersuchungen, insbesondere die der Kornoberflächen, sind nachfolgend dargestellt.

4.2.2.1.1 Elektronenmikroskopische Untersuchungen von Quarz

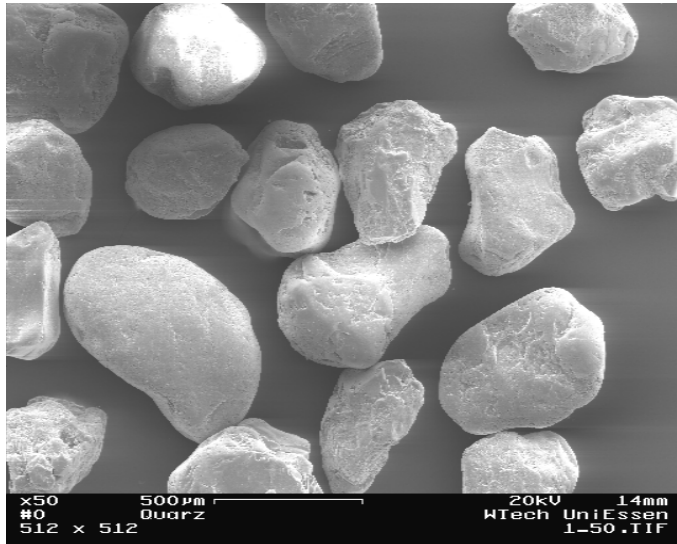


Bild 4.2.2.1.1.1 zeigt Quarz der Kornklasse **0,2 mm # d_p # 0,315 mm** unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 50-facher Vergrößerung. Die Quarzkörner weisen wie üblich rundliche Form auf.

Bild 4.2.2.1.1.1
Quarz (0,2; 0,315) mm unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 50-facher Vergrößerung

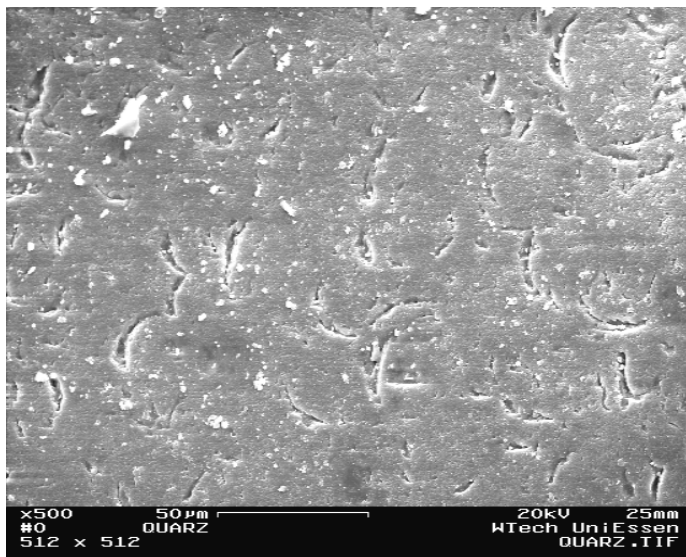


Bild 4.2.2.1.1.2 zeigt den Oberflächenausschnitt eines Quarzkornes (**0,2 mm # d_p # 0,315 mm**) unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 500-facher Vergrößerung. Dieses Bild gibt u. a. Aufschluss über die Rauigkeit der Oberfläche des Stoffes.

Bild 4.2.2.1.1.2
Quarz (0,2; 0,315) mm unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 500-facher Vergrößerung

In dem Bild 4.2.2.1.1.3 ist das Ergebnis der Oberflächenanalyse der Quarzprobe dargestellt. Auf der Oberfläche wurden erwartungsgemäß die Elemente Sauerstoff (O) und Silizium (Si) nachgewiesen. Die betrachtete Oberfläche war fremdstofffrei. Gold (Au) ist nach Katodenzerstäubung einer Au-Folie ("Sputtern") auf die Probenoberfläche aufgedampft worden.

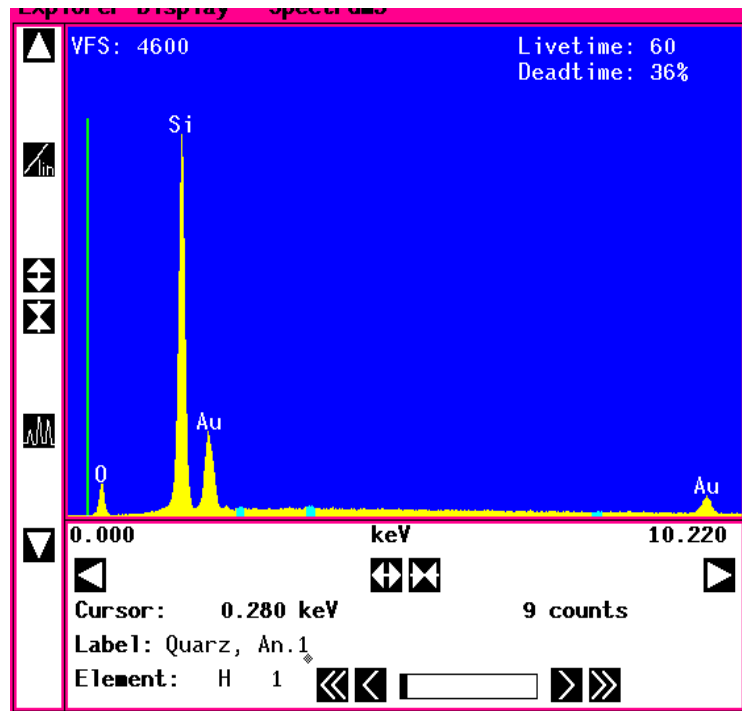


Bild 4.2.2.1.1.3
Oberflächenanalyse der Quarzprobe

4.2.2.1.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen des Leitungsschrottes

Das Bild 4.2.2.1.2.1 zeigt eine Probe des untersuchten, zerkleinerten Leitungsschrottes. Der Leitungsschrott besteht aus dem Leitermaterial Kupfer (Cu) und dem Isolierstoff Polyvinylchlorid („PVC“). Die Kupferanteile haben Zylinderform, während die Polyvinylchloridanteile unregelmäßig geformt sind.

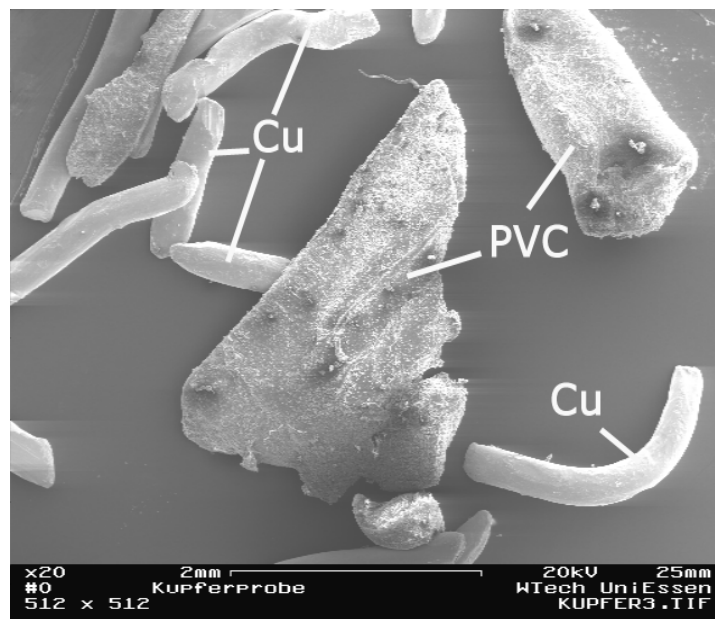


Bild 4.2.2.1.2.1
Leitungsschrott unter dem Rasterelektronen-
mikroskop (REM) bei 20-facher Vergrößerung

Bild 4.2.2.1.2.2 zeigt den Oberflächenausschnitt eines Kupferteilchens unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 500-facher Vergrößerung. Dieses Bild gibt einerseits Aufschluss über die Beschaffenheit der Kornoberfläche, andererseits sind die Anteile von Fremdstoffen als helle Stellen zu erkennen. Der Bereich der „hellen Stellen“ in der Bildmitte wurde einer Analyse zur Bestimmung der Fremdstoffanteile unterzogen.

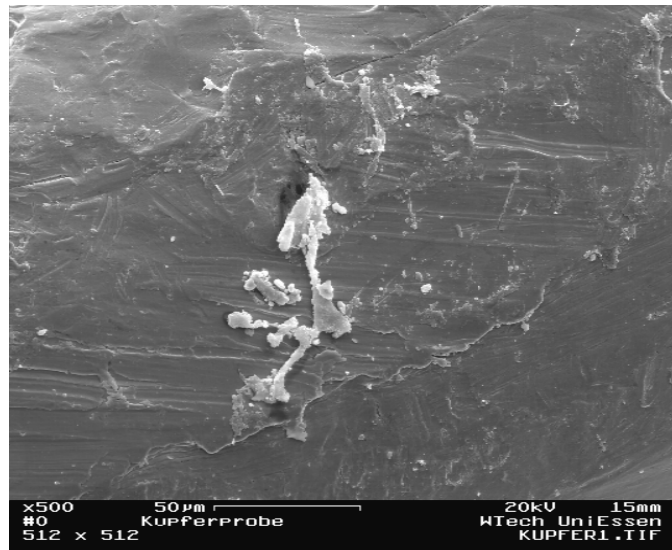


Bild 4.2.2.1.2.2
Kupferteilchen unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) bei 500-facher Vergrößerung

Bild 4.2.2.1.2.3 zeigt ein typisches Messblatt der Cu-Oberfläche. Neben dem Basismaterial Kupfer (x-ray3: Cu) konnten die Fremdelemente Chlor (x-ray1: Cl) und Calcium (x-ray2: Ca) nachgewiesen werden. Chlor- und Calciumanteil entstammen der organischen Verbindung PVC.

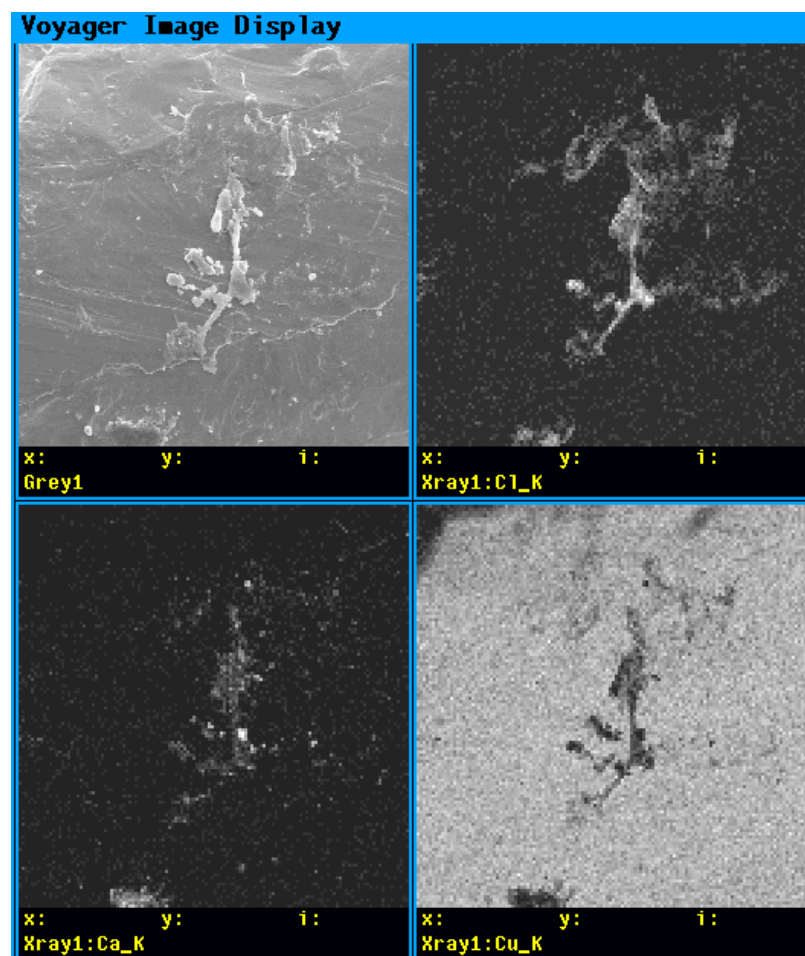


Bild 4.2.2.1.2.3
Messblatt „Oberflächenanalyse eines Kupferteilchens“

Bild 4.2.2.1.2.4 zeigt ein typisches Ergebnis der Elementaranalyse, die für eine kleine Teiloberfläche des „hellen Bereiches“ erstellt wurde.

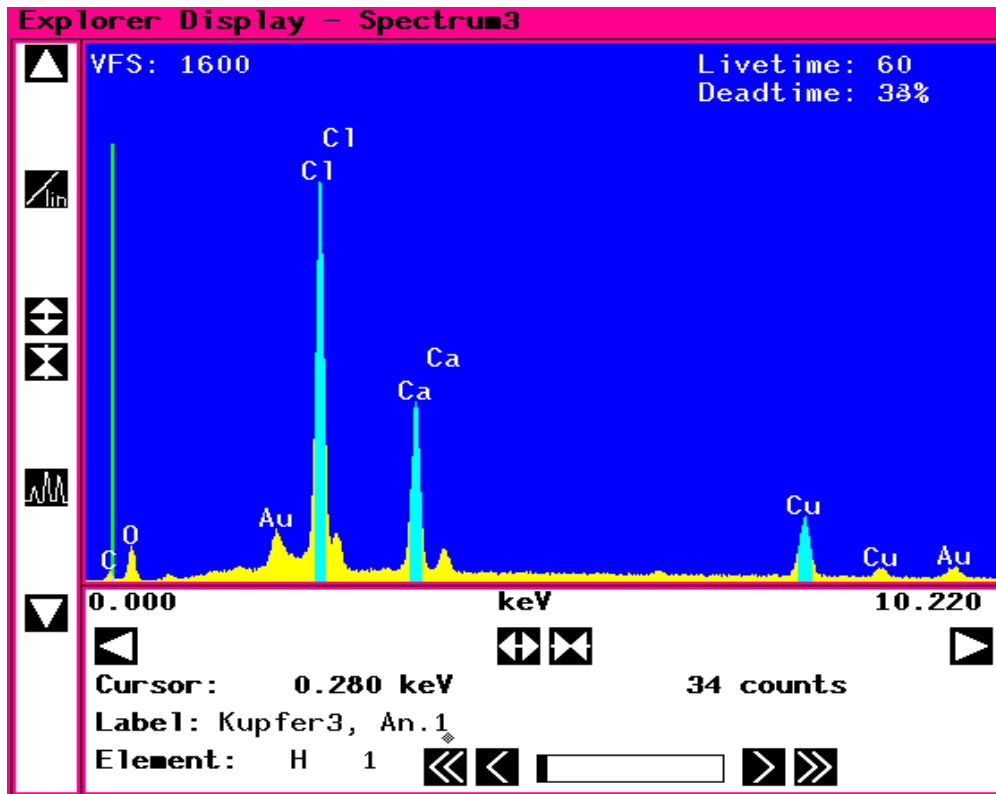


Bild 4.2.2.1.2.4
Oberflächenanalyse eines Kupferteilchens

Neben dem Basismaterial Kupfer (Cu) konnten die Fremdelemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Chlor (Cl) und Calcium (Ca) nachgewiesen werden. Kohlenstoff, Chlor- und Calciumanteile entstammen der organischen Verbindung PVC. Der Sauerstoffanteil entstammt der Oxidationsreaktion des Kupfers mit dem Sauerstoff der umgebenden Luft, während der Goldanteil wiederum auf das Sputtern der Probe zurückzuführen ist.

Die Versuchsstoffe weisen folgende Merkmale auf:

- die Oberflächen unterscheiden sich in ihrer Beschaffenheit
- die Oberflächen sind mehr oder weniger fremdstoffbehaftet
- elementare Zusammensetzung, also Unterschiede in der Dichte
- unterschiedliche Kornformen

Diese Merkmale können sich auf die Versuchsergebnisse auswirken, was z. B. auf den Seiten 44 und 45 erwähnt wurde.

4.2.2.2 Versuchsablauf der Tast- und Hauptversuche

Für alle *Tastversuche* wurden die folgenden Ablaufschritte gewählt:

- Waschen des Versuchsgutes in entionisiertem Wasser
- Trocknung bei **60/C** im Trockenschrank, Trocknungsdauer **24 h**
- Klimatisierung unter Versuchsbedingungen, Klimatisierungsdauer **24 h**
- Prüfen der Klimabedingungen
- Auswiegen von **100 ± 0,05 g** des klimatisierten Versuchsgutes
- Einstellen der gewünschten Walzenscheiderdrehzahl **n**
- Einschalten der Schwingrinne
- Einstellen der Frequenz **f** der Schwingrinne
- Freischalten der Erdung in der Hochspannungsanlage
- Einschalten der Anlage und Einstellen der Hochgleichspannung **U**
- Aufgabe der Versuchsstoffe auf die Schwingrinne
- Start des Basic-Messprogrammes "BEMESS" [P3], Eingabe der Versuchsparameter
- Nach dem Auffangen der aller Teilchen: Speicherung der Versuchsdaten
- Abschaltung der Hochspannung - Sicherung gegen Wiedereinschaltung
- Prüfung auf Spannungsfreiheit
- Erdung der Hochspannungsanlage
- Wägung der Becherinhalte, Abfüllung der Versuchsstoffe
- Reinigung des Walzenscheiders mit Ethanol
- Bearbeiten der Versuchsdaten - Auswertung mit der Software nach Kapitel 5, Seite 51
- Analyse der Becherinhalte
- Trocknung
- Klimatisierung
- Wägung der Stoffkomponenten
- Bestimmung der Massenverhältnisse
- Erstellung und Ausgabe der Diagramme für:
 - Adie Verteilung der Massen **m_i** auf die **i**-Auffangfächer
 - Aden zeitlichen Verlauf der elektrischen Stoffladung **Q_i** in den Messbechern
 - Adie elektrische Ladung **Q_i** am Versuchsende bezogen auf die zugehörige Masse **m_i**
- Angabe des Masseausbringens **MA** bzw. des Trennerfolges **T_E**.

Nach den Ergebnissen der *Tastversuche* wurde bei den *Hauptversuchen* auf das Waschen des Versuchsgutes mit entionisiertem Wasser verzichtet.

4.2.2.3 Planung der Versuchsreihen

Auf der Grundlage der Liste 4.2.2.3.1 werden die Versuchsreihen geplant.

Liste 4.2.2.3.1: Planung der Versuchsreihen

Variationen:

Stoffe: *Quarz, Cu, PVC*

Korngröße: d_p

Spannung U , Drehzahl n ,
relative Luftfeuchtigkeit n ,

Temperatur h

Konstante Größen:

Durchmesser D der Walze: $D = 180 \text{ mm}$

Durchmesser d der Rohrelektrode: $d = 30 \text{ mm}$

Abstand a zwischen Walze und Rohrelektrode:
 $a = 55 \text{ mm}$

Elektrodenwinkel α_o : $\alpha_o = 153^\circ$

Kriterium: Wurfweite x_w

Trennfachbreite x : $x = 20 \text{ mm}$

Höhe des Auffangkastens y_o : $y_o = -120 \text{ mm}$

Abstand h_a zwischen Aufgaberinne und Walze:
 $h_a = 2 \text{ mm}$

Die Auswahl der Versuchsstoffe Quarz, Cu und PVC wurde bereits behandelt. In Bezug auf die Korngröße d_p bzw. die Kornklasse liegt

- Quarz, Kornklasse $0,2 \text{ mm} \# d_{pQ} \# 0,315 \text{ mm}$, eng klassiert und
- Cu und PVC, Kornklasse $2 \text{ mm} \# d_{pL} \# 5 \text{ mm}$, relativ weit klassiert vor.

Für die Versuche werden die Größen variiert, die in der betrieblichen Anwendung den Trennvorgang vermutlich besonders beeinflussen werden.

Dazu gehören die

- elektrische Spannung U des Elektrodensystems
- Drehzahl n der Walze
- relative Luftfeuchtigkeit n des Versuchsguts und des Trennraums
- Temperatur h des Versuchsguts und des Trennraums.

Zu dieser Problematik wurden Tastversuche durchgeführt. Die Variation von U und n muss für die beiden Fälle

- $U = 0$ und Variation von n
- $U \dots 0$ und Variation von n

folgende überschlägige Grundaussagen erfüllen:

Fall 1: $U = 0$ und Variation von n

Für diesen Fall sind die mechanischen Kräfte wie die Fliehkraft F_F und die Schwerkraft F_G als wesentliche Kräfte anzusetzen. D. h. mit $F_F \sim m n^2$ und $F_G = m g$ bestimmen Teilchenmasse m , das Quadrat der Walzendrehzahl n und die Schwerebeschleunigung g überschlägig die Flugbahn. Demnach müssen gleichartige Teilchen mit wachsender Drehzahl n größere Wurfweiten x_w erreichen.

Bemerkung:

Kontakte *Teilchen - Teilchen* bzw. *Teilchen - Walze* führen ebenfalls zu zeitabhängigen Teilchenladungen $Q(t)$. Die Tastversuche ergaben: Die zu $[Q(t)]^2$ - proportionale elektrische Bildkraft ist gegenüber den mechanischen Kräften vernachlässigbar!

Fall 2: $U \neq 0$ und Variation von n

Neben den mechanischen Kräften des Falles 1, wirken im Trennraum nun zusätzlich die elektrischen Feldkräfte F_E mit $F_E = Q E$. D. h. die elektrischen Feldkräfte F_E , also die zeitabhängigen Ladungen $Q(t)$ und die ortsabhängigen elektrischen Feldstärken $E(x,y)$, beeinflussen ebenfalls die Flugbahnen der Teilchen.

5 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse zur Trennung von Quarz nach der Teilchenmasse m bzw. nach Unterschieden in der Korngröße d_p sowie zur Sortierung von Leitungsschrott sind in Diagrammen anschaulich dargestellt.

Dazu werden die Messdaten, die das Basicprogramm „BEMESS“ ausgibt, an ein Excel-Programm übergeben. Das Excel-Programm erstellt mit Hilfe eines eigens in Excel - Makrosprache ausgeführten Programmteiles [49] folgende Diagramme:

- Verteilung der ausgebrachten Massenanteile m_i auf die i-Auffangfächer
- Abhängigkeit $Q_i(t)$, d. h. der in einem Becher i aufgefundenen elektrischen Ladung Q_i von der Zeit t
- Verhältnis von Becherladung $Q_i(t)$ zur aufgefundenen Masse m_i
- vergleichende Darstellung der in sechs unterschiedlichen Bechern aufgefundenen elektrischen Ladungen.

Diese Diagramme enthalten alle zur Auswertung notwendigen Informationen. Beispielhaft wird nachfolgend eine Auswahl der Versuchsergebnisse vorgestellt.

5.1 Ausgewählte Ergebnisse der Versuche zur Klassierung

Die Versuche zur Klassierung von Quarz wurden gemäß den Tabellen 5.1.1 bis 5.1.6 auf Seite 53 und 54 durchgeführt. Die jeweilige Versuchsbezeichnung hat die Zeichenkombination „3 Kleinbuchstaben, 1. Zahl, Unterstrich, 2. und 3. Zahl“.

Darin steht

- der 1. *Kleinbuchstabe* für die Hochspannungsanwendung, d. h.
 - o**: für Versuch **ohne** Hochspannung bzw.
 - m**: für Versuch **mit** Hochspannung
- der 2. *Kleinbuchstabe* für den Versuchsstoff, d. h. **q**: für Quarz
- der 3. *Kleinbuchstabe* für die Kornform, d. h. **q**: runde Kornform
- die 1. *Zahl* für die Versuchsserie, z. B. **2**, d. h. für konstante Temperatur
 $h = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und konstante relative Feuchte **$n = 50\%$**
- der *Unterstrich* als Trennstrich
- die 2. *Zahl* für die Hochspannung **U**, d. h.
 - 1**: für **$U = 0\text{ kV}$** ; **2**: für **$U = 10\text{ kV}$** ; **3**: für **$U = 20\text{ kV}$**
- die 3. *Zahl* für die Walzendrehzahl **n**, d. h.
 - 1**: für **$n = 20\text{ min}^{-1}$** ; **2**: für **$n = 100\text{ min}^{-1}$** ; **3**: für **$n = 150\text{ min}^{-1}$**

Am Beispiel der Versuchsbezeichnung „oqq1_11“ wird die Bedeutung der Zeichenkombination „oqq1_11“ mit der Zuordnungsliste 5.1.1 anschaulich verdeutlicht.

Zuordnungsliste 5.1.1

Zuordnung zwischen Zeichenkombination und Versuchsbezeichnung

Versuchsbezeichnung oqq1_11						
o	q	q	1	_	1	1
Hochspannung: ohne	Versuchsstoff: Quarz	Kornform: rund	Versuchsserie 1: $h = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $n = 40\%$	Trennstrich als Unterstrich	Hochspannung $U = 0\text{ kV}$	Walzendrehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

Tabelle 5.1.1:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 1

$h = 20$ /C ; $n = 40$ % ;

Datum: 26. 10. 94

Versuch	U / kV	$n / min-1$
oqq1_11	0	20
oqq1_12	0	100
oqq1_13	0	150
mqq1_21	10	20
mqq1_22	10	100
mqq1_23	10	150
mqq1_31	20	20
mqq1_32	20	100
mqq1_33	20	150

Tabelle 5.1.2:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 2

$h = 20$ /C ; $n = 50$ % ;

Datum: 21. 10. 94

Versuch	U / kV	$n / min-1$
oqq2_11	0	20
oqq2_12	0	100
oqq2_13	0	150
mqq2_21	10	20
mqq2_22	10	100
mqq2_23	10	150
mqq2_31	20	20
mqq2_32	20	100
mqq2_33	20	150

Tabelle 5.1.3:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 3

$h = 20$ /C ; $n = 60$ % ;

Datum: 20. 10. 94

Versuch	U / kV	$n / min-1$
oqq3_11	0	20
oqq3_12	0	100
oqq3_13	0	150
mqq3_21	10	20
mqq3_22	10	100
mqq3_23	10	150
mqq3_31	20	20
mqq3_32	20	100
mqq3_33	20	150

Tabelle 5.1.4:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 4

$h = 30$ /C ; $n = 40$ % ;

Datum: 27. 10. 94

Versuch	U / kV	$n / min-1$
oqq4_11	0	20
oqq4_12	0	100
oqq4_13	0	150
mqq4_21	10	20
mqq4_22	10	100
mqq4_23	10	150
mqq4_31	20	20
mqq4_32	20	100
mqq4_33	20	150

Tabelle 5.1.5:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 5

$h = 30$ /C ; $n = 50$ % ;

Datum: 31. 10. 94

Versuch	U / kV	n / min-1
oqq5_11	0	20
oqq5_12	0	100
oqq5_13	0	150
mqq5_21	10	20
mqq5_22	10	100
mqq5_23	10	150
mqq5_31	20	20
mqq5_32	20	100
mqq5_33	20	150

Tabelle 5.1.6:

Quarz d_p , (0,2;0,315) mm - Serie 6

$h = 30$ /C ; $n = 60$ % ;

Datum: 02. 11. 94

Versuch	U / kV	n / min-1
oqq6_11	0	20
oqq6_12	0	100
oqq6_13	0	150
mqq6_21	10	20
mqq6_22	10	100
mqq6_23	10	150
mqq6_31	20	20
mqq6_32	20	100
mqq6_33	20	150

Die Versuche wurden nach diesem Schema mit Variation von

- Spannung U
- Walzendrehzahl n
- Temperatur h und
- relativer Luftfeuchtigkeit n

durchgeführt.

Aus dem Versuchsprogramm wurden die Versuche oqq4_11 und mqq4_21 zur näheren Untersuchung ausgewählt. Die zugehörigen nachfolgenden Bilder 5.1.1 bis 5.1.8 enthalten exemplarisch alle Informationen über die ausgewählten Versuche. Sie sind Grundlage der im Abschnitt 6.1 vorgenommenen Versuchsauswertung.

Massenverteilung

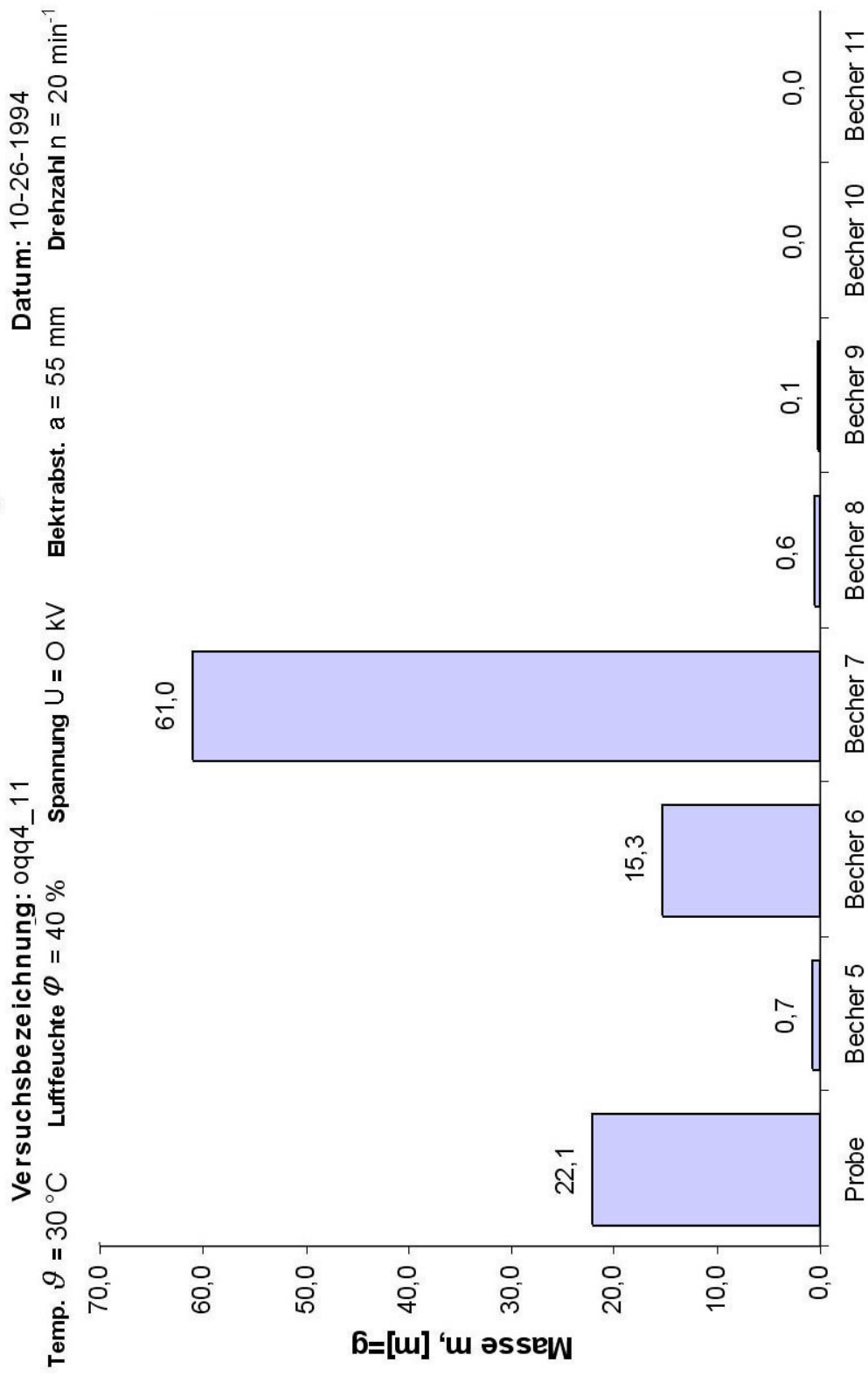


Bild 5.1.1
 Versuch oqq4_11: Massenverteilung

Ladungsverlauf der einzelnen Becher

Versuchsbezeichnung: oqq4_11

Datum: 10-26-1994

Temp. $\vartheta = 30^\circ \text{C}$

Luftf. $\varphi = 40\%$

Spannung $U = 0 \text{ kV}$

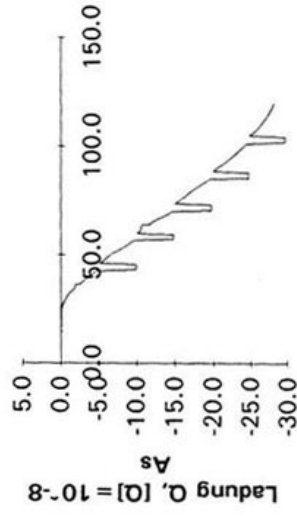
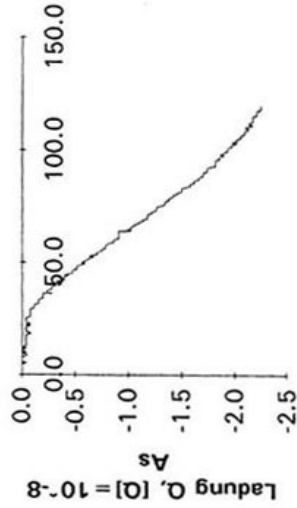
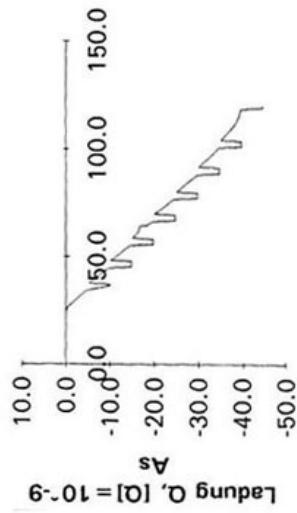
Elektrabst. $a = 55 \text{ mm}$

Drehz. $n = 20 \text{ min}^{-1}$

Probe

Becher 5

Becher 6



Becher 7

Becher 8

Becher 9

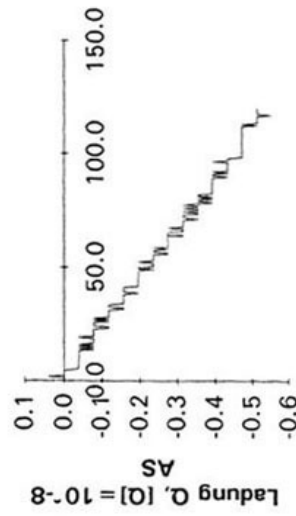
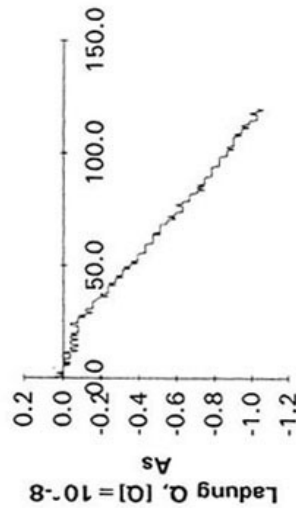
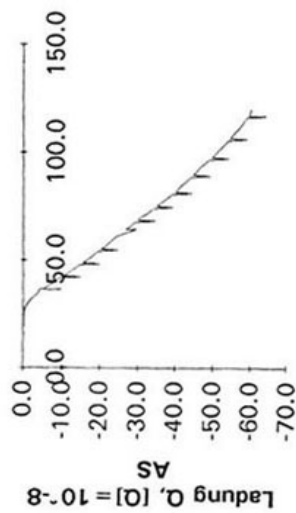


Bild 5.1.2

Versuch oqq4_11: Ladungsverlauf der einzelnen Becher i

Ladung / Masse

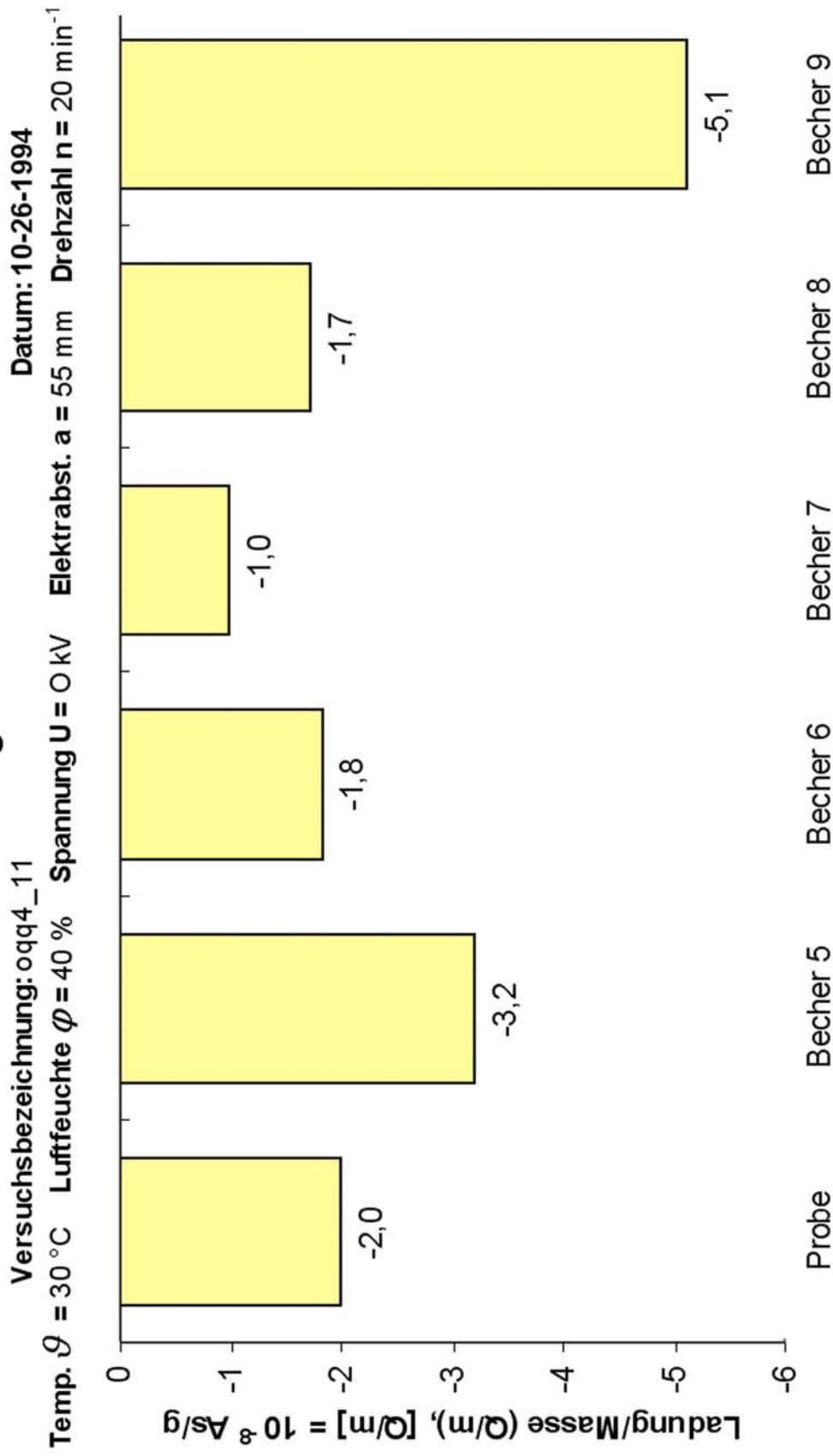


Bild 5.1.3
Versuch oqq4_11: Ladung / Masse

Endladung

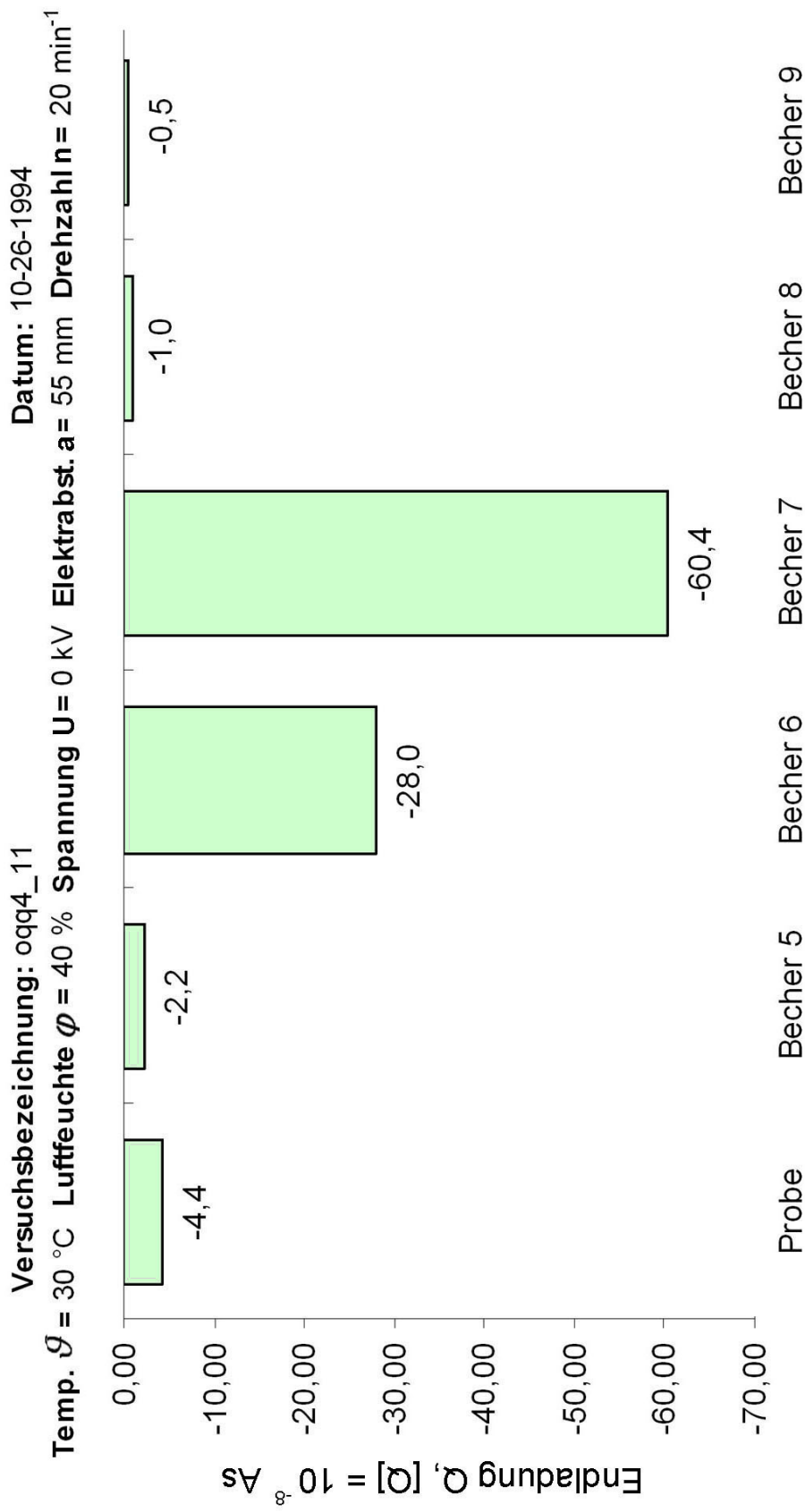


Bild 5.1.4
Versuch oqq4_11: Endladung

Massenverteilung

Versuchsbezeichnung: mqq4_21
 Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luffeuchte $\varphi = 40\text{ }\%$ Spannung $U = 10\text{ kV}$ Elektroabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$
 Datum: 10-26-1994



Bild 5.1.5
 Versuch mqq4_21: Massenverteilung

Ladungsverlauf der einzelnen Becher

Versuchsbezeichnung: mq4_21 Datum: 10-26-1994 Drehz. $n = 20 \text{ min}^{-1}$
 Temp. $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ Luftf. $\varphi = 40\%$ Spannung $U = 10 \text{ kV}$ Elektrost. $a = 55 \text{ mm}$

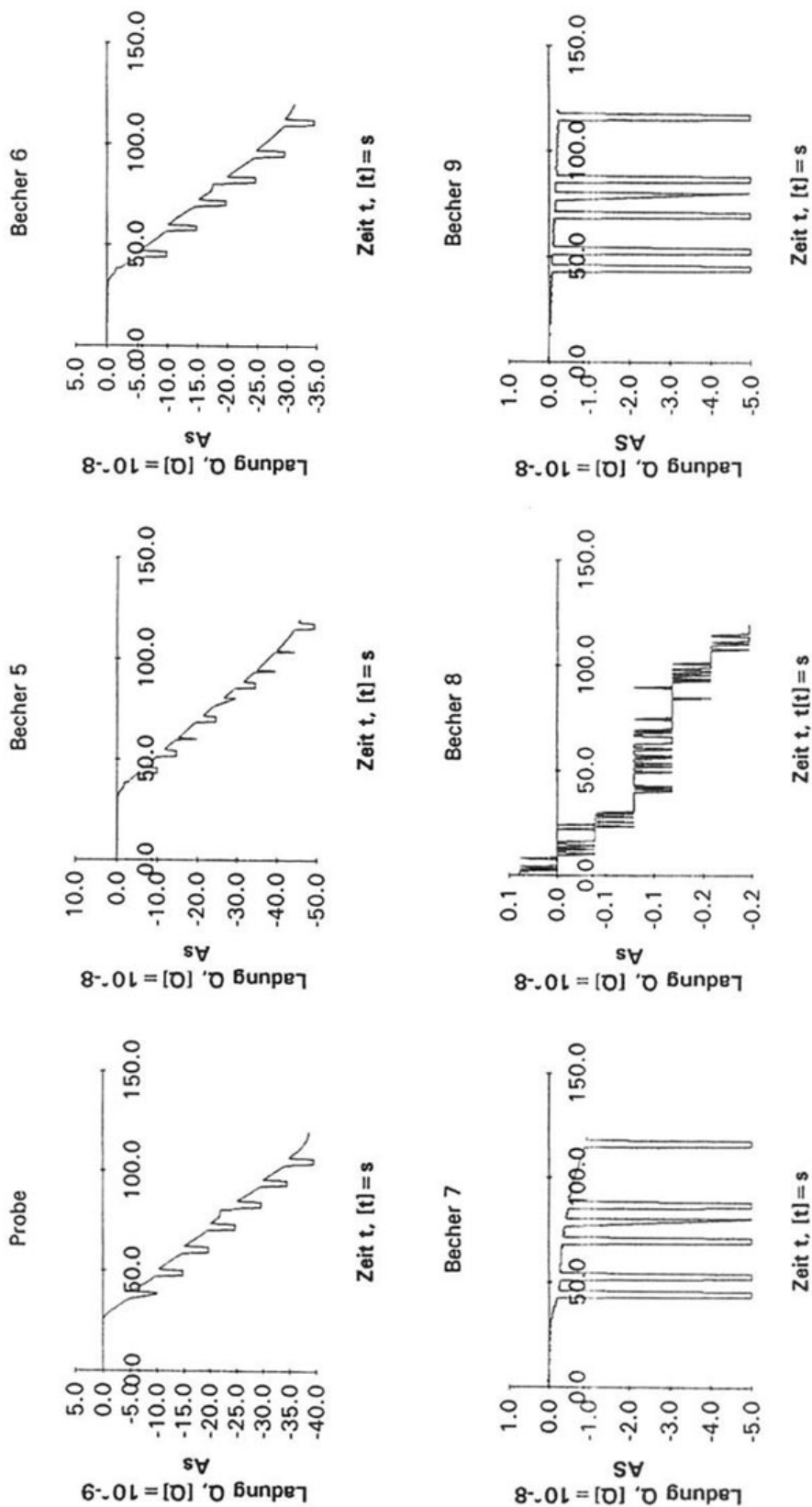


Bild 5.1.6
 Versuch mq4_21: Ladungsverlauf der einzelnen Becher i

Ladung / Masse

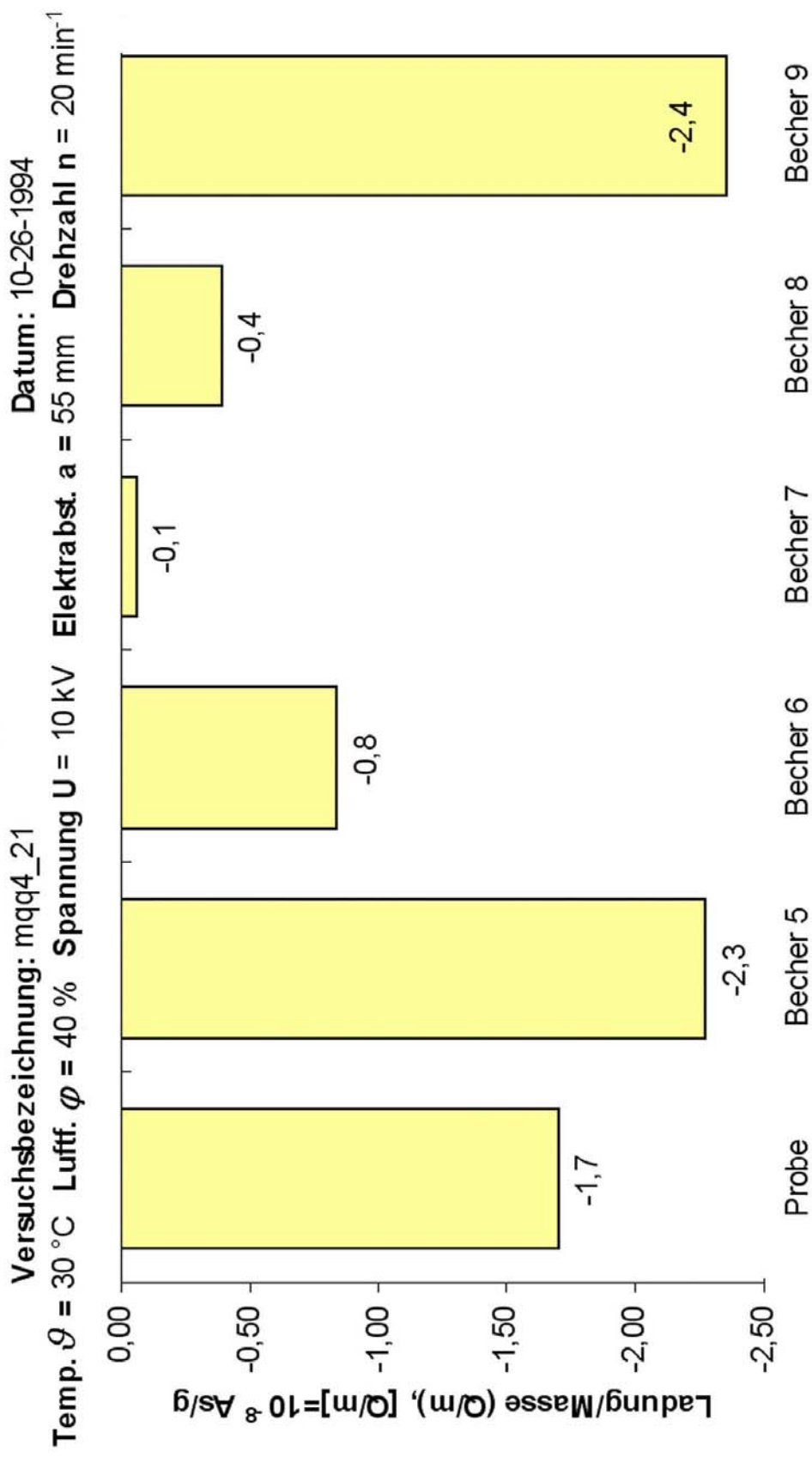


Bild 5.1.7
 Versuch mq4_21: Ladung / Masse

Enladung

Versuchsbezeichnung: mq4_21 Datum: 10-26-1994
 Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftf. $\varphi = 40\%$ Spannung $U = 10\text{ kV}$ Elektroabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

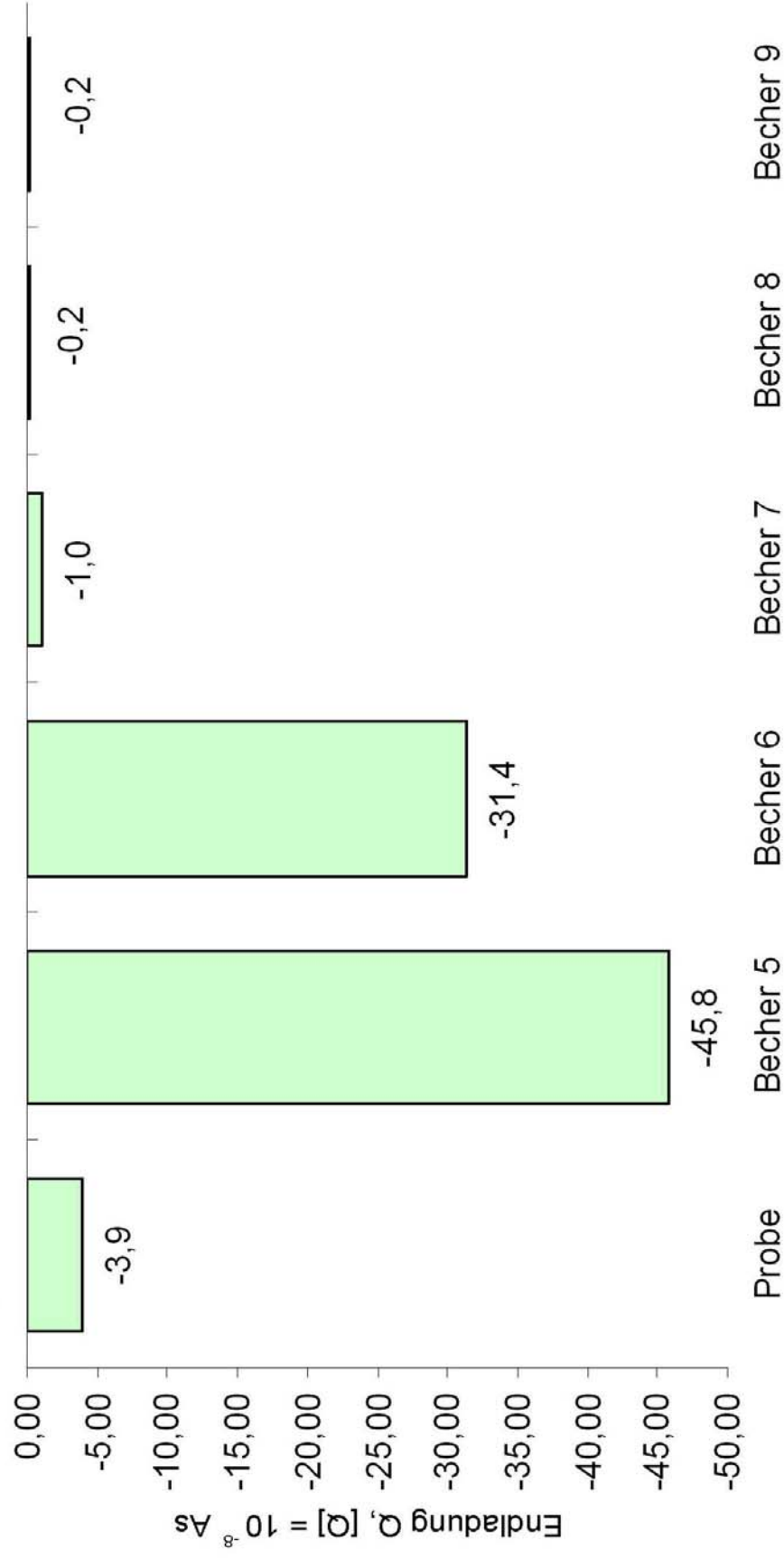


Bild 5.1.8
 Versuch mq4_21: Enladung

5.2 Ausgewählte Ergebnisse der Versuche zur Sortierung

Die Versuche zur Sortierung wurden gemäß Tabelle 5.2.1 durchgeführt. Die jeweilige Versuchsbezeichnung hat die Zeichenkombination „Großbuchstabe plus zwei Zahlen“. Darin steht

- der Großbuchstabe, für relative Feuchte **$n = \text{const.}$** und Temperatur **$h = \text{const.}$** ,
- die 1. Zahl, für die gewählte Drehzahl **n ($n \in \{20, 100, 150\}$)** gemäß der zugeordneten Spalte (1, 3 oder 4) und
- die 2. Zahl, für die gewählte Hochspannung **U ($U/\text{kV} \in \{0, 10, 20\}$)** gemäß der zugeordneten Reihe (1, 2 oder 3)

Tabelle 5.2.1: Bezeichnung der Versuche zur Sortierung von Leitungsschrotten

A	$n =$ 40 %	$h =$ 20/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

D	$n =$ 40 %	$h =$ 30/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

B	$n =$ 50 %	$h =$ 20/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

E	$n =$ 50 %	$h =$ 30/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

C	$n =$ 60 %	$h =$ 20/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

F	$n =$ 60 %	$h =$ 30/°C		
	1	3	4	
n/min^{-1}	20	100	150	
U/kV	0	0	0	1
	10	10	10	2
	20	20	20	3

Nachfolgend werden die Zuordnungen am Beispiel des Versuches „D32“ erläutert.
Beispiel:

Versuch „**D32**“

- Buchstabe „**D**“, d. h.

*Relative Feuchte **n** = 40 %, Temperatur **h** = 30/C*

- 1. Zahl „**3**“, d. h. *Walzendrehzahl **n** = 100 min⁻¹*

- 2. Zahl „**2**“, d. h. *Spannung **U** = 10 kV*

Die Versuche wurden nach diesem Schema mit Variation von Spannung **U**, Walzendrehzahl **n**, Temperatur **h** und relativer Luftfeuchtigkeit **n** durchgeführt.

Die nachfolgenden Bilder 5.2.1 bis 5.2.8 enthalten exemplarisch alle Informationen über die ausgewählten Versuche F13 und E13. Sie sind Grundlage der im Abschnitt 6.2 vorgenommenen Versuchsauswertung.

Massenverteilung

Versuchsbezeichnung: e13_1 Datum: 10-04-1993
 Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftfeuchte $\phi = 50\%$ Spannung $U = 20\text{ kV}$ Elektrabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

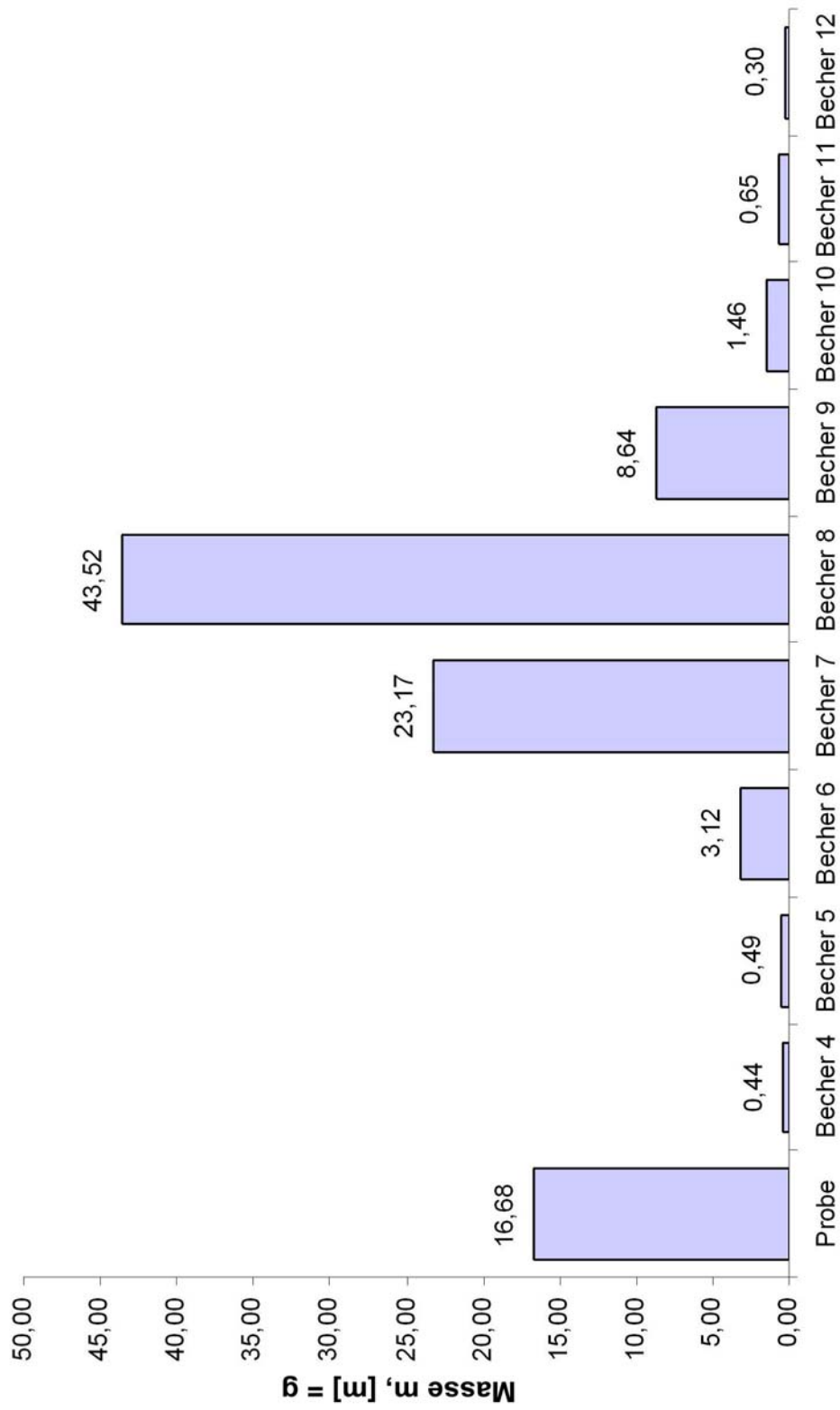


Bild 5.2.1
 Versuch E13: Massenverteilung

Ladungsverlauf der einzelnen Becher

Versuchsbezeichnung: e13_1 Datum: 10-04-1993 Drehz.: 20 min⁻¹
 Temp.: 30 °C Luftf.: 50 % Spannung: 20 kV Elektrabst: 55 mm

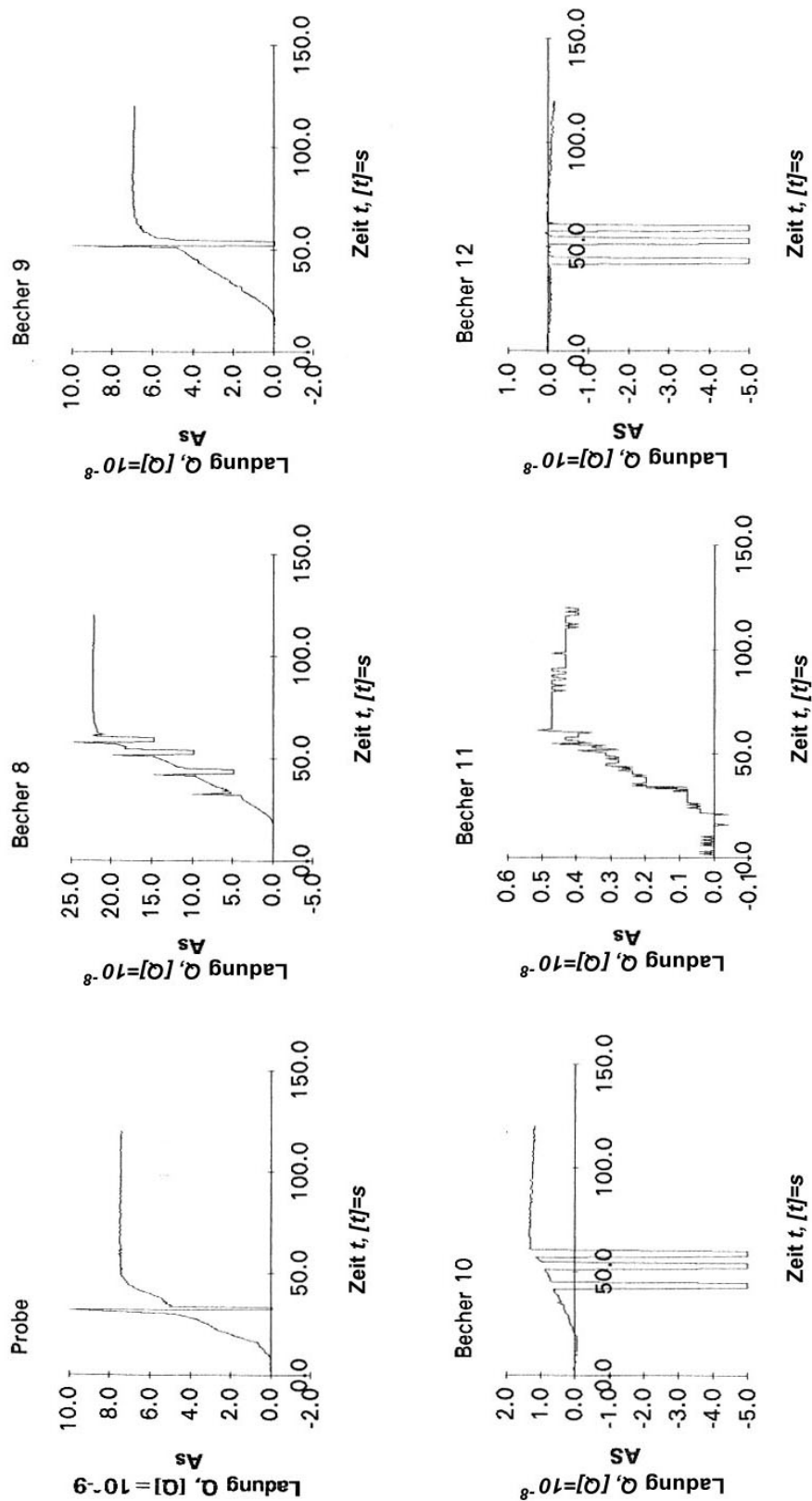


Bild 5.2.2
Versuch E13: Ladungsverlauf der einzelnen Becher i

Ladung / Masse

Versuchsbezeichnung: e13_1

Datum: 10-04-1993

Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftfeuchte $\varphi = 50\text{ }\%$ Spannung $U = 20\text{ kV}$ Elektrabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

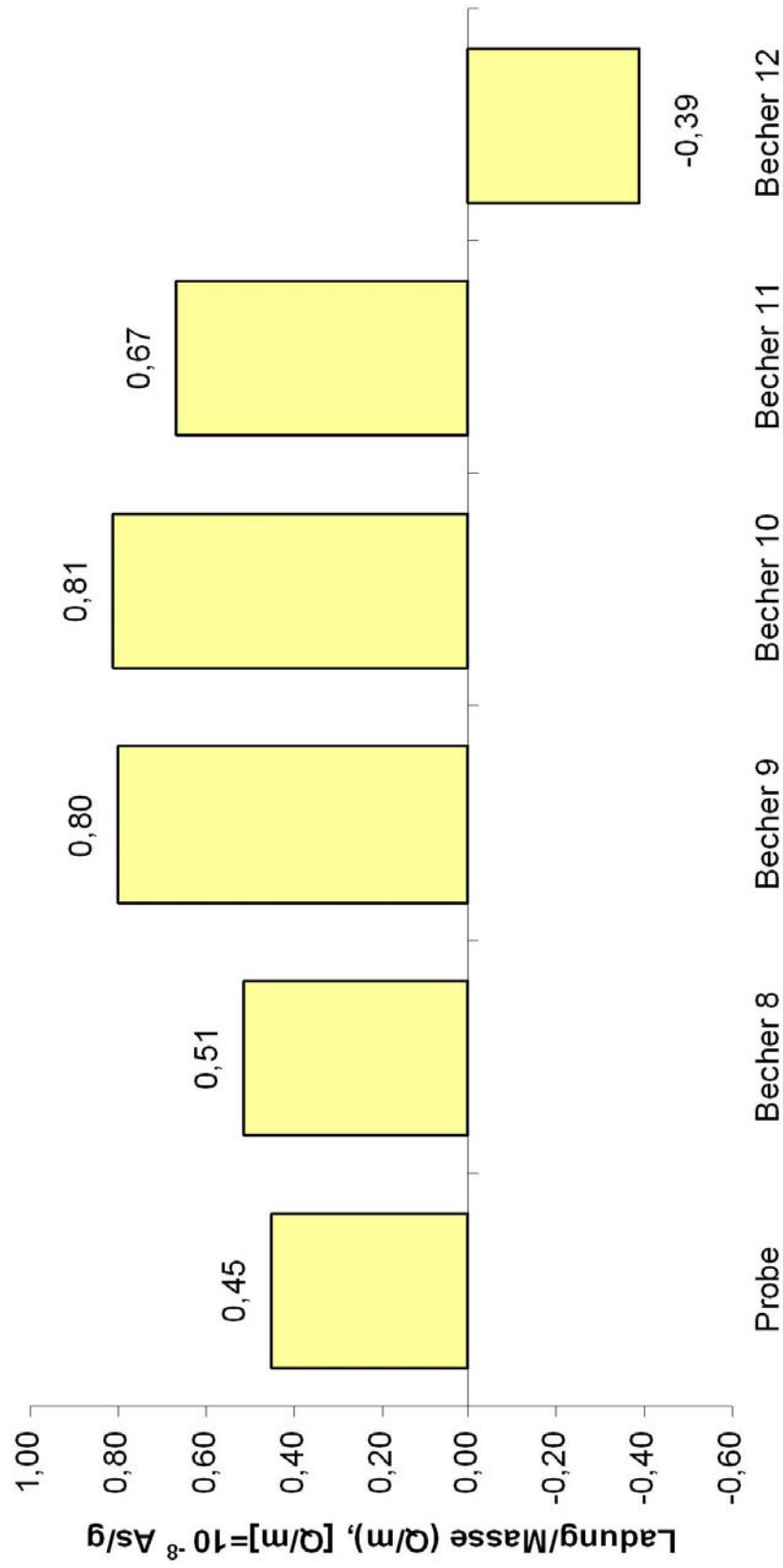


Bild 5.2.3
Versuch E13: Ladung / Masse

Endladung

Versuchsbezeichnung: e13_1

Datum: 10-04-1993

Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftfeuchte $\varphi = 50\%$ Spannung $U = 20\text{ kV}$ Elektrabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

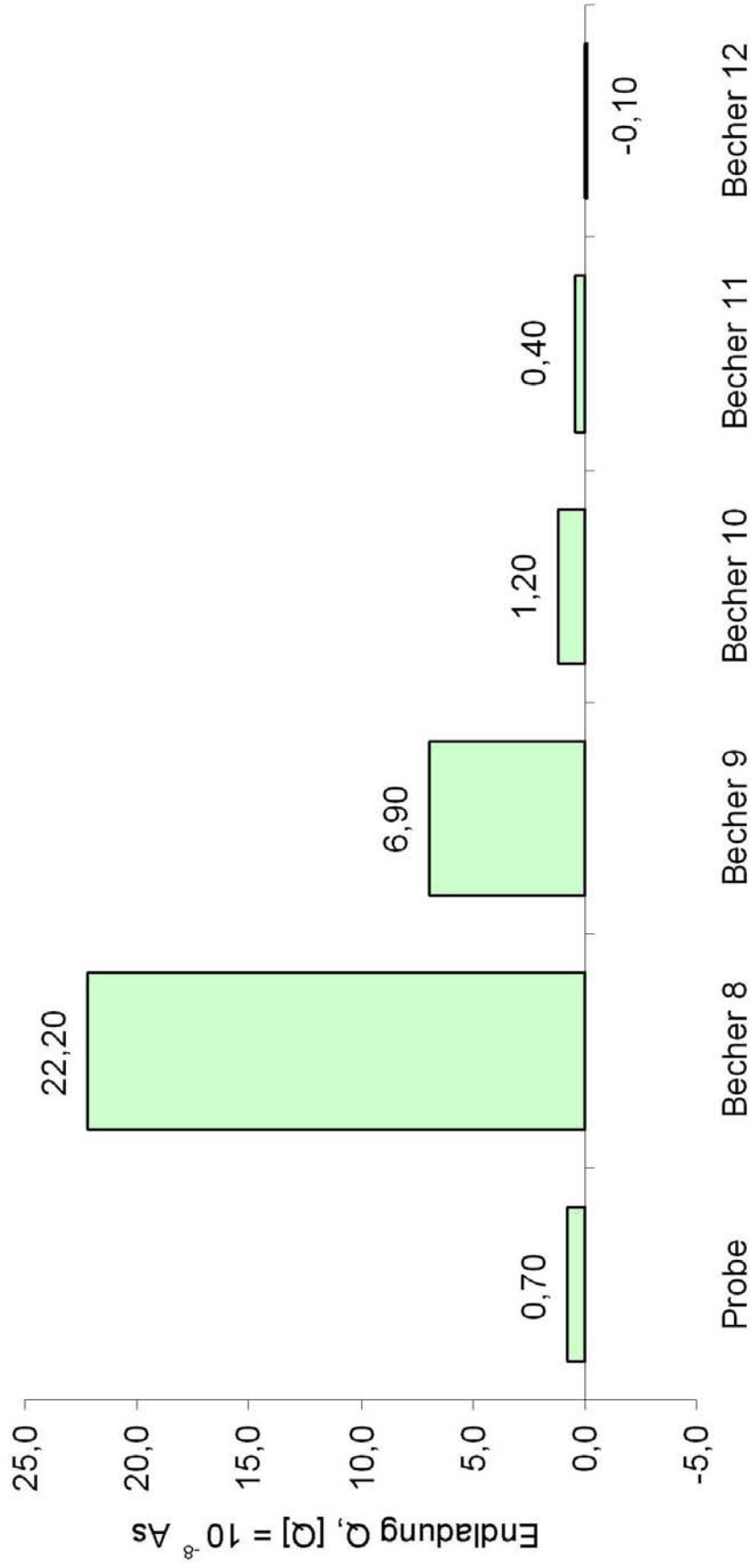


Bild 5.2.4
Versuch E13: Endladung

Massenverteilung

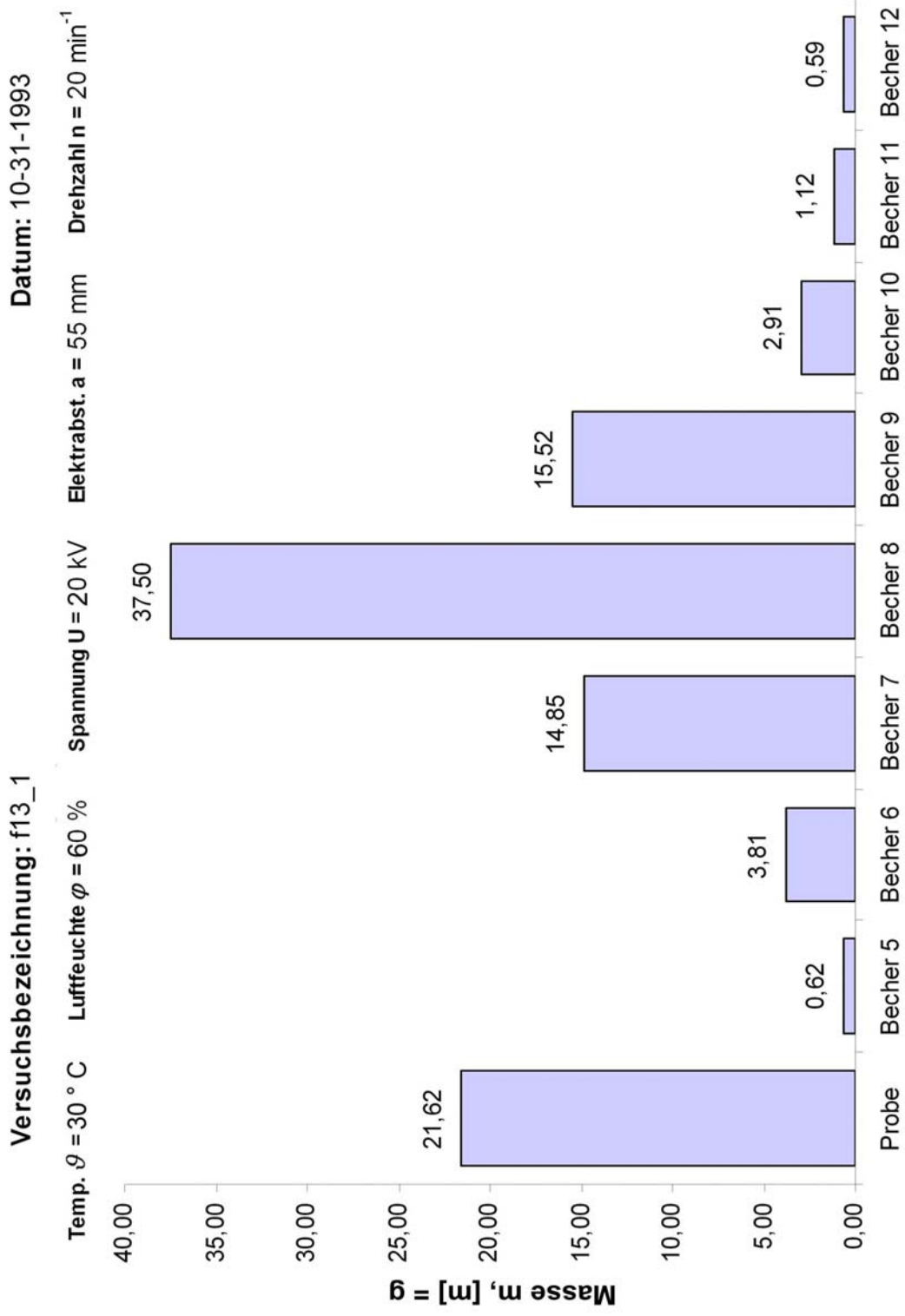


Bild 5.2.5
Versuch F13: Massenverteilung

Ladungsverlauf der einzelnen Becher

Versuchsbezeichnung: f13_1
 Temp.: 30 °C
 Datum: 10-31-1993
 Spannung: 20 kV
 Elektrabst: 55 mm
 Drehz.: 20 min⁻¹
 Luftf.: 60 %

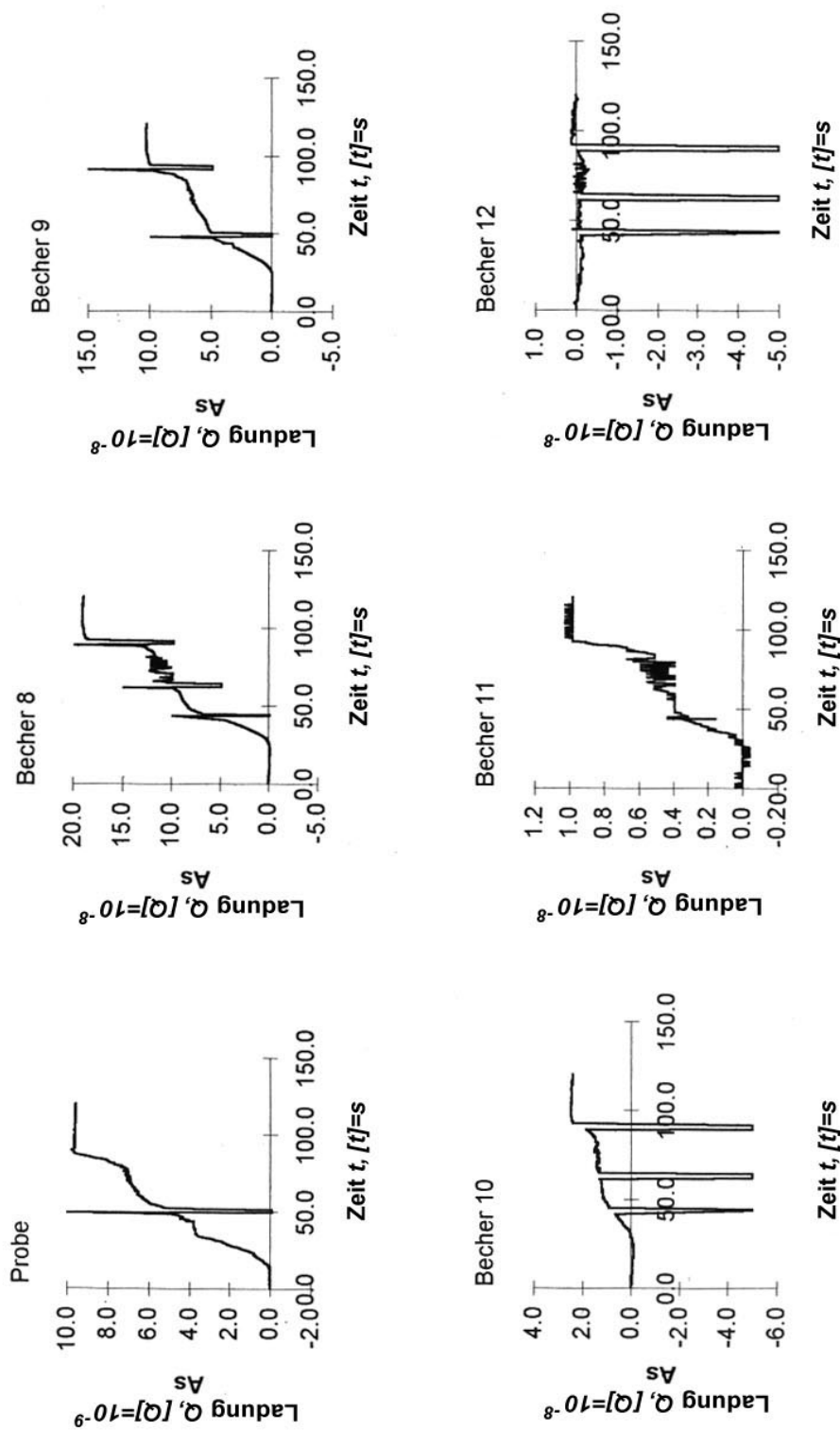


Bild 5.2.6
 Versuch F13: Ladungsverlauf der einzelnen Becher i

Ladung / Masse

Versuchsbezeichnung: f13_1

Datum: 10-31-1993

Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftfeuchte $\varphi = 60\%$ Spannung $U = 20\text{ kV}$ Elektrabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

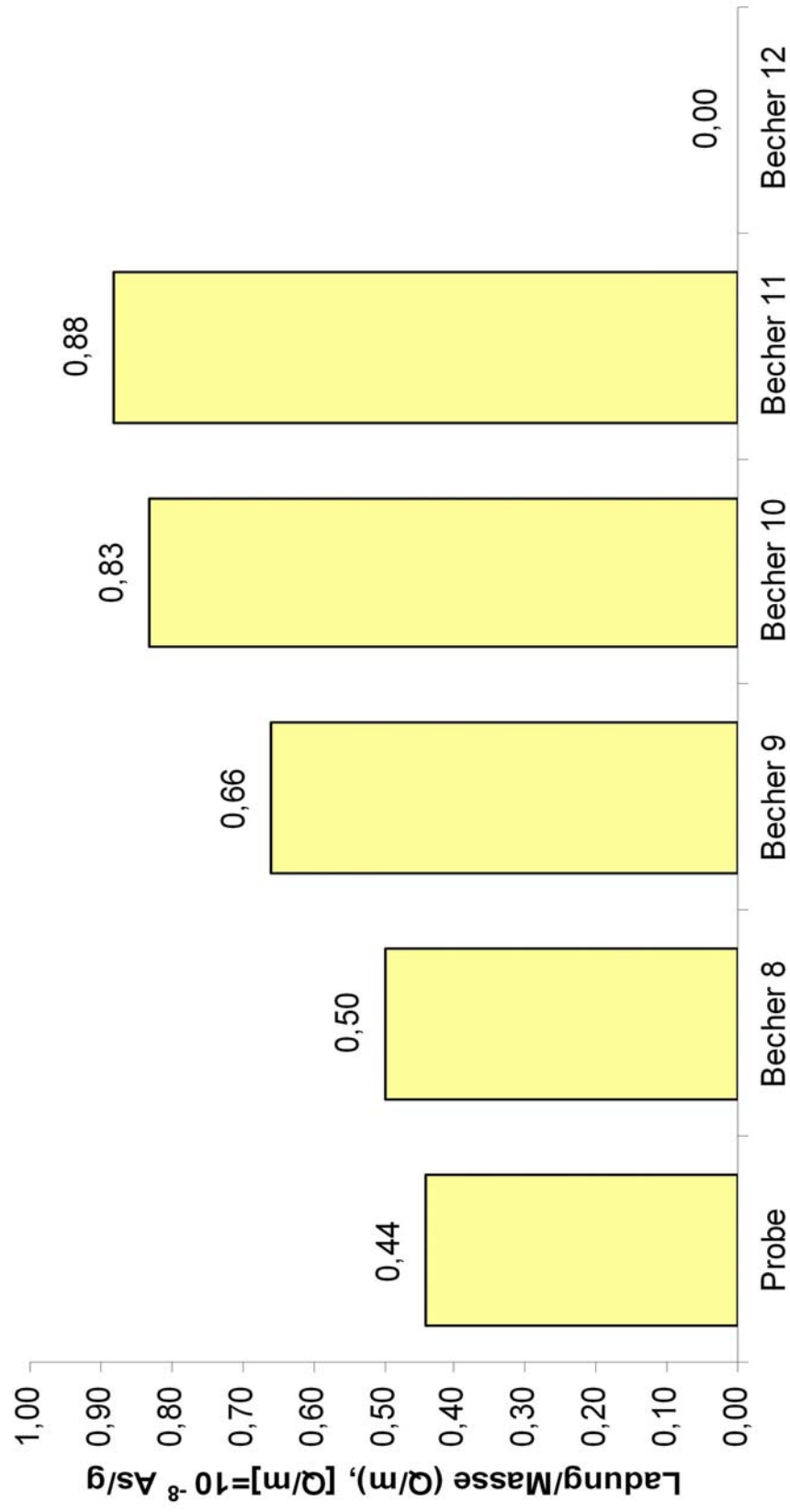


Bild 5.2.7
Versuch F13: Ladung / Masse

Endladung

Versuchsbezeichnung: f13_1

Datum: 10-31-1993

Temp. $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Luftfeuchte $\varphi = 60\%$ Spannung $U = 20\text{ kV}$ Elektrabst. $a = 55\text{ mm}$ Drehzahl $n = 20\text{ min}^{-1}$

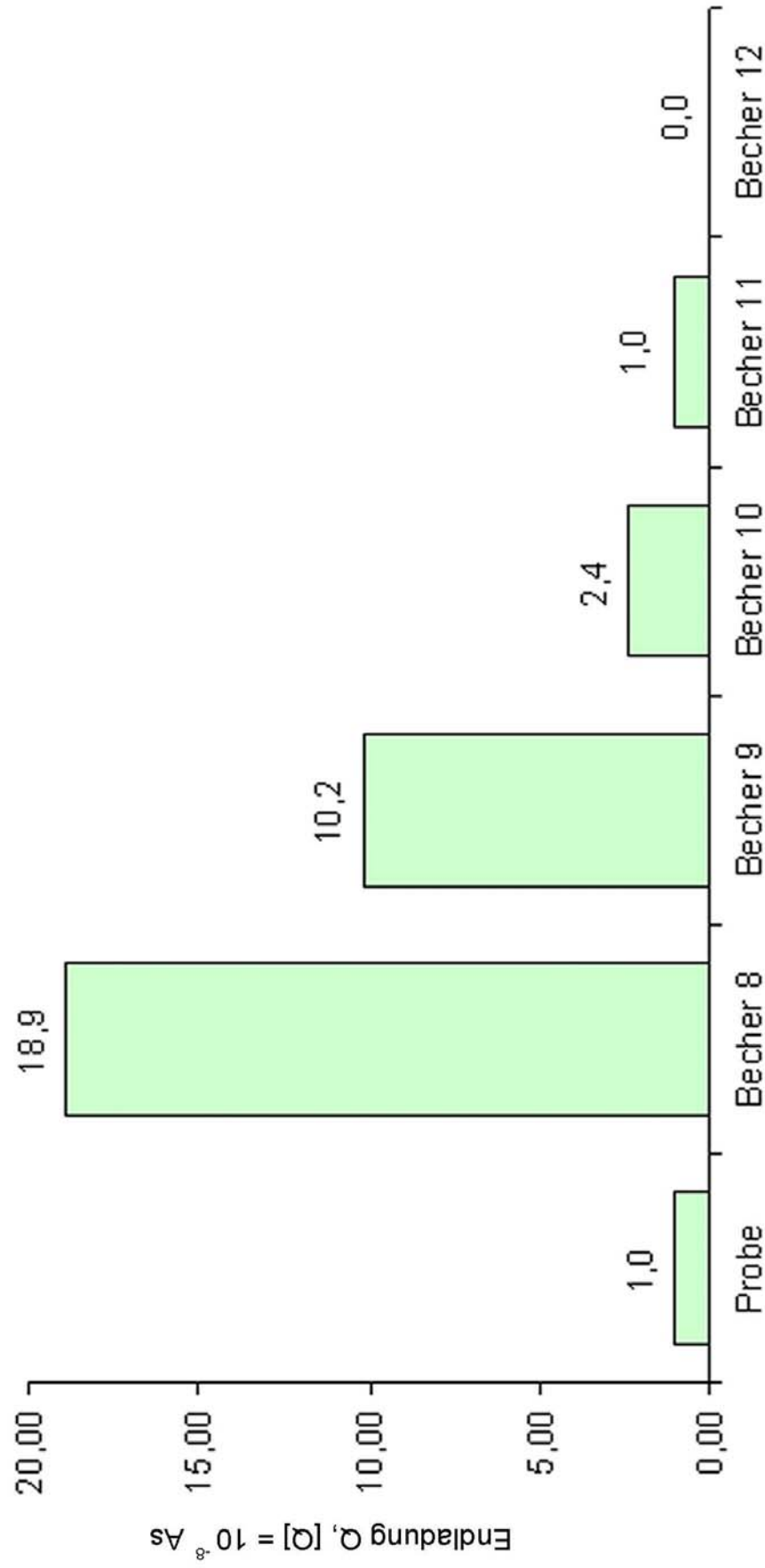


Bild 5.2.8

Versuch F13: Endladung

6 Versuchsauswertung

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Kapitels 5, also der Versuche zur Klassierung von Quarz sowie zur Sortierung von Leitungsschrotten aus Cu und PVC, ausgewertet. Die Auswertung erfolgt zunächst danach, wie sich die Variation der betrieblichen Einflussgrößen auf die Trennergebnisse ausgewirkt hat. Anschließend wird der Einfluss der elektrischen Stoffaufladung auf das Trennergebnis untersucht.

6.1 Auswirkungen der betrieblichen Einflussgrößen auf die Klassierergebnisse

Die Auswirkungen der betrieblichen Einflussgrößen auf die Klassierergebnisse werden mit Hilfe der *bezogenen Verteilungssumme* $fm(n)$ und der daraus gebildeten Kornstreuung δ untersucht. Die *bezogene Verteilungssumme* $fm(n)$ wird aus der jeweiligen Verteilung der Massen m_i auf die i -Auffangbecher und der *insgesamt aufgefangenen Masse* m_A wie folgt bestimmt:

$$fm(n) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{m_A}$$

Im Bild 6.1.1 ist eine *bezogene Verteilungssumme* $fm(n)$ als Funktion der jeweiligen Bechernummer i mit $i \in g(6; 11)$ bzw. der Wurfweite x_w mit $x_w \in g(100; 220) \text{ mm}$ grundsätzlich dargestellt.

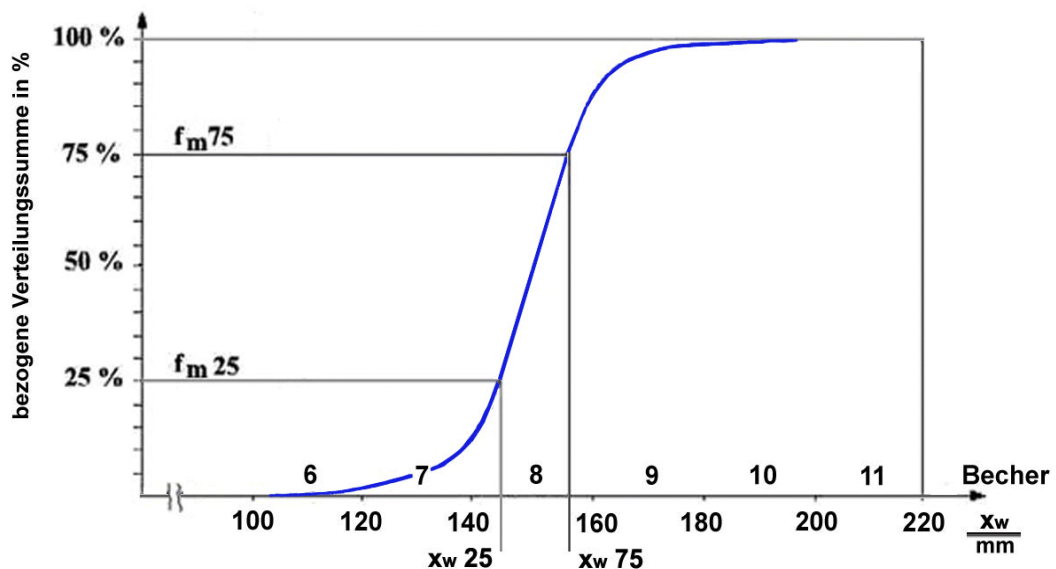


Bild 6.1.1

Bezogene Verteilungssumme - grundsätzliche Darstellung

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird der mittlere Bereich der bezogenen Verteilungssumme $fm(n)$ mit $25\% \leq fm(n) \leq 75\%$ betrachtet. Die Bereichsgrenzen tragen die allgemeinen Bezeichnungen $fm 25$ und $fm 75$. Den Bereichsgrenzen sind die Wurfweiten $x_{w 25}$ und $x_{w 75}$ zugeordnet. Der Quotient aus $x_{w 75}$ und $x_{w 25}$ wird als

Kornstreuung δ bezeichnet [12]. Es gilt:

$$k = \frac{x_{w75}}{x_{w25}}$$

Der Fall der idealen Klassierung ist durch die Kornstreuung $\delta = 1$ gekennzeichnet, die reale Klassierung durch $\delta > 1$.

In den Versuchen werden die Größen variiert, die auch unter betrieblichen Bedingungen den Trennvorgang vermutlich besonders beeinflussen. Dazu gehören *Elektroden-spannung* U , *Drehzahl* n der Walze, *relative Luftfeuchtigkeit* n und *Temperatur* h . Als Versuchsgut wurde Quarz in der Kornklasse $dp\ g[0,2 ; 0,315]\ mm$ verwendet, um den Einfluss stofflicher Unterschiede auf den Trennvorgang auszuschalten.

6.1.1 Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 0\ kV$

In Bild 6.1.1.1 sind die bezogenen Verteilungssummen $f_m(n)$ der Reihe 4 - Versuche oqq4_11, oqq4_12, oqq4_13 - bei einer Elektroden-spannung $U = 0\ kV$ dargestellt.

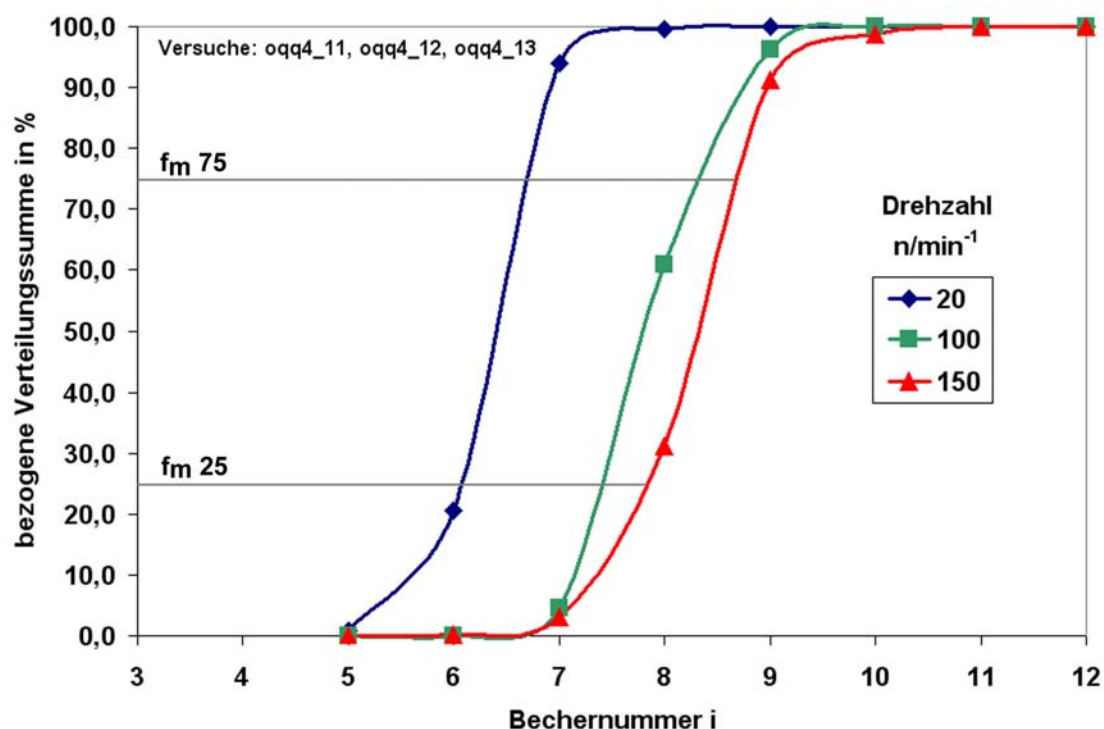


Bild 6.1.1.1: Bezogene Verteilungssummen in % für $U = 0\ kV$

Innerhalb der Kornklasse erfolgte als Wirkung der auftretenden Fliehkräfte eine Trennung nach der Masse der Teilchen. Die Trennung ist nur durch die Korngrößenunterschiede der Teilchen bedingt und nicht gleichzeitig auch durch stoffliche Unterschiede. Demzufolge ist anzunehmen, dass sich das feinste Korn in der Nähe der Trommel ansammelt. Körner mit mittlerem Korndurchmesser werden in einem größeren

Abstand, grobe Körner in großem Abstand von der Trommel ausgetragen. Die Kurvenverläufe in Bild 6.1.1.1 zeigen diese deutliche Abhängigkeit der Wurfweite der Quarzteilchen von der Drehzahl n .

6.1.2 Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 10 \text{ kV}$

In Bild 6.1.2.1 sind die bezogenen Verteilungssummen $f_m(n)$ der Reihe 4 - Versuche mqq4_21, mqq4_22, oqq4_23 - bei einer Elektrodenspannung $U = 10 \text{ kV}$ dargestellt.

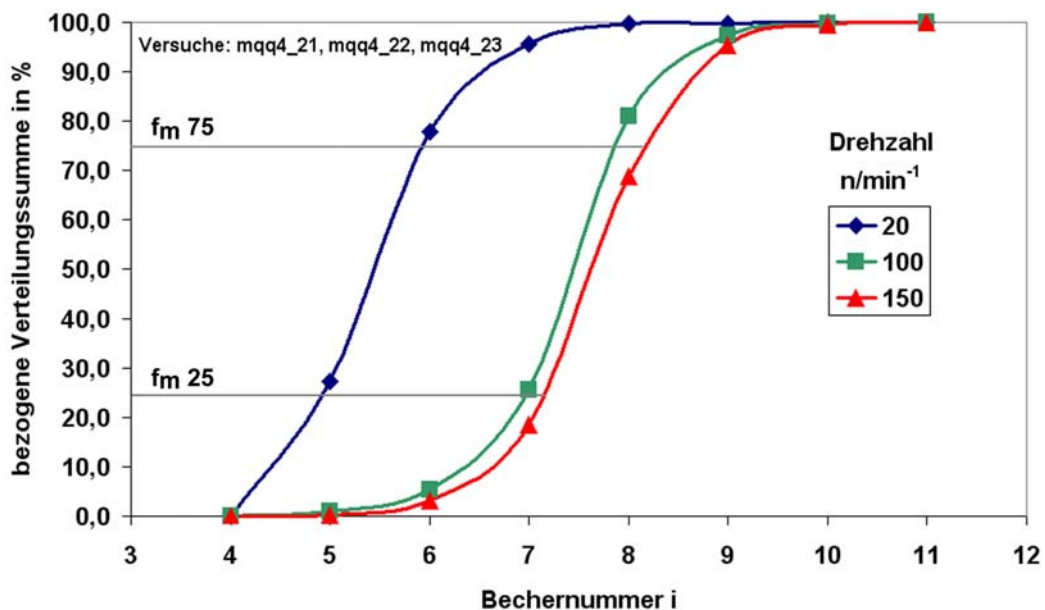


Bild 6.1.2.1: Bezogene Verteilungssummen in % für $U = 10 \text{ kV}$

Im Vergleich zu den Kurvenverläufen des Bildes 6.1.1.1 werden die Stoffteilchen bei einer Spannung von 10 kV näher zur Walzenachse ausgetragen. Das ist auf die Wirkung der elektrischen Feldkraft zurück zu führen. Bei negativer Teilchenladung $Q(t)$ und der von der Walze zur Stabelektrode gerichteten elektrischen Feldstärke werden die Teilchen in Richtung Walze gedrückt - die Wurfweite verringert sich.

Beispielhaft für die Auswertung seien hier die in Tabelle 5.1.4 aufgeführten Versuchsbedingungen vorgestellt, deren Ergebnisse in der jeweilig zugehörigen Abbildung für die *Massenverteilung*, den *Ladungsverlauf der einzelnen Becher*, das Verhältnis *Ladung/Masse* und die *Endladung* enthalten sind.

Parallel hierzu wurden die Versuchsreihen der Tabellen 5.1.1 bis 5.1.3 und 5.1.5 bis 5.1.6 unter gleichen Bedingungen für Drehzahl und Elektrodenspannung durchgeführt. Zunächst wurden Versuche ohne Elektrodenspannung bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt - hierbei konnte also nur die auftretende Fliehkraft F_F die Trennung der Probe bewirken. Bei den vorgestellten Massenverteilungen der Versuche oqq4_11,

oqq4_12 oder oqq4_13 ist deutlich zu sehen, dass mit zunehmender Drehzahl in weiter von der Walze entfernt angeordnete Becher ausgetragen wird. Das Korn mit größerer Masse wird somit in den weiter von der Walze entfernten Bechern ausgetragen.

6.1.3 Bezogene Verteilungssummen der Versuchsreihe 4 - $U = 20 \text{ kV}$

In Bild 6.1.3.1 sind die bezogenen Verteilungssummen $f_m(n)$ der Reihe 4 - Versuche mqq4_31, mqq4_32, mqq4_33 - bei einer Elektrodenspannung $U = 20 \text{ kV}$ dargestellt.

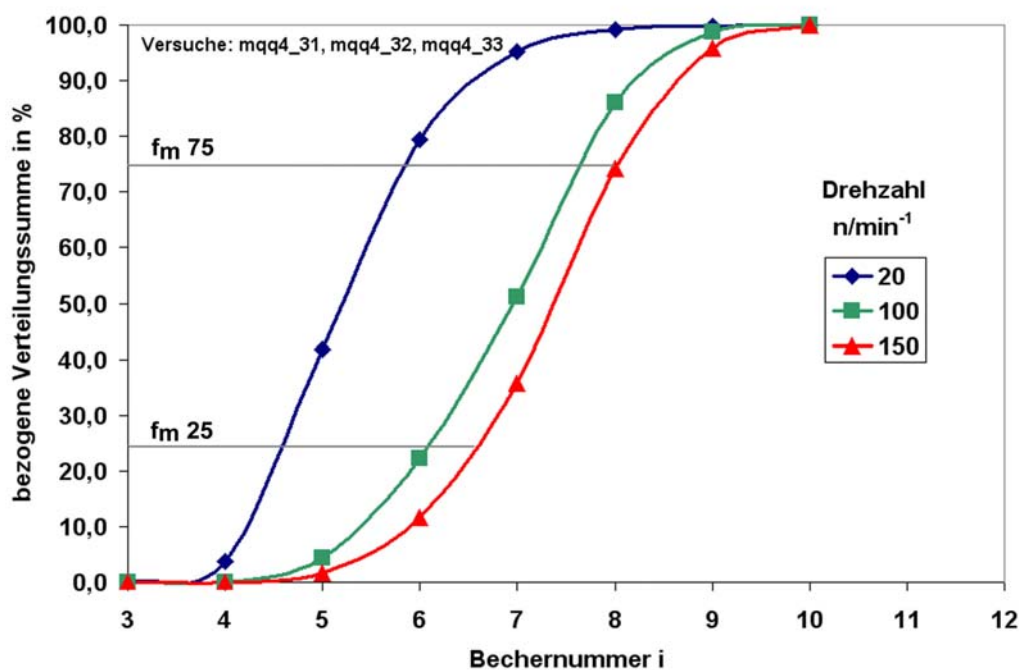


Bild 6.1.3.1: Bezogene Verteilungssummen in % für $U = 20 \text{ kV}$

Die Wirkung der elektrostatischen Aufladung bei der Elektrodenspannung $U = 20 \text{ kV}$ wird durch den Vergleich der Versuche mqq4_31, mqq4_32 und mqq4_33 mit den Versuchen oqq4_11, oqq4_12 und oqq4_13 deutlich.

Die elektrostatische Aufladung führt in Verbindung mit der Elektrodenspannung dazu, dass das Ausbringen trotz der höheren Drehzahl wesentlich näher an der Walze erfolgt als bei den Versuchen ohne Spannung. Mit wachsender elektrischer Spannung U nimmt die Kornstreuung **6**zu.

Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit kann durch den Vergleich der Versuche F13_1 und E13_1 verdeutlicht werden. Der sehr geringe Unterschied zwischen den verschiedenen Klassierergebnissen deutet auf eine vernachlässigbare Änderung der Flugbahn der Teilchen hin.

Eine aufwändige Be- bzw. Entfeuchtung der Umgebungsluft führt somit zu keiner

nennenswerten Verbesserung der Klassier- bzw. Sortiерergebnisse. D. h. die verhältnismäßig aufwändige Klimatisierung kann im untersuchten Klimabereich entfallen. Die so mit Quarz erzielten Versuchsergebnisse könnten als Grundlage zur Beurteilung der Trennergebnisse für Stoffgemische, wie z. B. Leitungsschrotte, dienen.

6.2 Auswirkungen der betrieblichen Einflussgrößen auf die Sortiерergebnisse

Die Beurteilung der Sortiерergebnisse hinsichtlich der Kriterien „Qualität der Stofftrennung“, „Ergiebigkeit des Prozesses“ und „Trenngüte“ erfolgt durch die drei Kennzahlen [52, 53, 54]

- Sortenreinheit $\$$
- Abtrennungsgrad $\prime\prime$ und
- Trennerfolg T_E

Diese Kennzahlen werden mit Bezug auf Bild 6.2.1 angegeben. Das Bild zeigt das technische System „Elektrostatischer Walzenscheider“ mit den umgesetzten Stoffen.

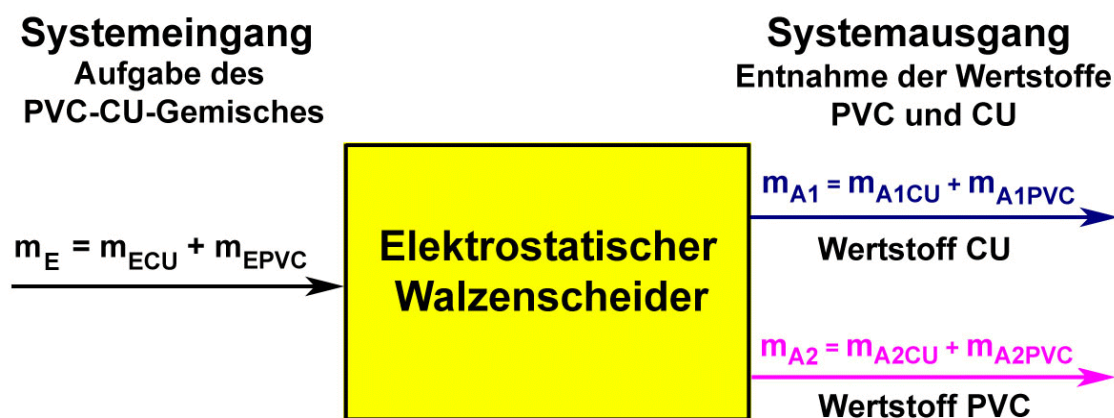


Bild 6.2.1 Massenbilanz des Systems „Elektrostatischer Walzenscheider“

Das System hat einen Ein- und einen Ausgang. Am Eingang wird dem System die Eingangsgröße „Masse m_E des Cu-PVC-Gemisches“ zugeführt. Die Masse m_E setzt sich aus der Masse m_{ECU} des Kupferanteils und der Masse m_{EPVC} des Polyvinylchloridanteils wie folgt zusammen:

$$m_E = m_{ECU} + m_{EPVC}$$

Am Systemausgang sollen die Massen m_{A1} und m_{A2} auf unterschiedlichen Seiten des jeweils gewählten Trennschnittes ausgetragen werden. Die Masse m_{A1} setzt sich aus dem angereicherten Wertstoff Cu der Masse m_{A1CU} und dem Reststoff PVC der

Masse m_{A1PVC} zusammen. Die Masse m_{A2} besteht aus dem angereicherten Wertstoff PVC der Masse m_{A2PVC} und dem Reststoff Cu der Masse m_{A2CU} . Es gilt:

Der Fall " $m_{A1PVC} = m_{A2CU} = 0$ " kennzeichnet die ideale Sortierung, d. h. der Trenn-

$$m_{ECU} = m_{A1CU} + m_{A2CU} \quad \text{und} \quad m_{EPVC} = m_{A2PVC} + m_{A1PVC}$$

schnitt ist eine senkrechte Gerade. Das bedeutet:

- der Wertstoff Cu befindet sich allein in einem Auffangbecher oder in einer Becherguppe
- der Wertstoff PVC befindet sich allein in einem anderen Auffangbecher oder in einer anderen Becherguppe.

Unter der berechtigten Annahme, dass die aufgegebene Masse m_E der aufgefange-
nen Masse $m_{A1} + m_{A2}$ entspricht, folgt:

Nach dem Aufstellen der Massenbilanzen werden nun die Kennzahlen *Sortenreinheit*

$$m_{A1} = m_{A1CU} + m_{A1PVC} \quad \text{und} \quad m_{A2} = m_{A2PVC} + m_{A2CU}$$

\$ *Abtrennungsgrad* " und *Trennerfolg* T_E als Verhältnisse von Massen der umge-
setzten Stoffe angegeben. Die Kennzahlen sind für die Wertstoffe Cu und PVC in
Tabelle 6.2.1 dargestellt.

Tabelle 6.2.1

Definitionen der Kennzahlen *Sortenreinheit*, *Abtrennungsgrad* und *Trennerfolg*

Wert- stoff	Kennzahlen		
	<i>Sortenreinheit</i> \$	<i>Abtrennungsgrad</i> "	<i>Trennerfolg</i> T_E
Cu	$\$_{A1CU} = \frac{m_{A1CU}}{m_{A1}}$	$"_{A1CU} = \frac{m_{A1CU}}{m_{ECU}}$	$T_{ECU} = "_{A1CU} \cdot \$_{A1CU}$
PVC	$\$_{A2PVC} = \frac{m_{A2PVC}}{m_{A2}}$	$"_{A2PVC} = \frac{m_{A2PVC}}{m_{EPVC}}$	$T_{EPVC} = "_{A2PVC} \cdot \$_{A2PVC}$

6.2.1 Analyse der Versuchsergebnisse auf der Basis des Trennerfolges

Die nachfolgende Analyse der Versuchsergebnisse basiert auf dem Trennerfolg T_E .
Die Kennzahlen T_E , " und \$ sind nach den Betrachtungen des Abschnittes 6.2 u. a.

von der Wurfweite x_w und somit von der Trennwurfweite x_{WT} , also dem *Trennschnitt* zwischen den angereicherten Wertstoffen Cu und PVC abhängig.

Daher werden zuerst die Trennschnitte mit Hilfe von Diagrammen der bezogenen Massenverteilung m_B für Cu bzw. PVC folgender Form behandelt:

$$m_{BCU} = \frac{m_{ACU}(x_w)}{m_{A1CU} + m_{A2CU}} \quad \text{bzw.} \quad m_{BPVC} = \frac{m_{APVC}(x_w)}{m_{A1PVC} + m_{A2PVC}}$$

Danach ist der Trennerfolg T_E und seine Abhängigkeit von den betrieblichen Einflussgrößen Walzendrehzahl n , Elektrodenspannung U , relative Feuchte n und Temperatur h Gegenstand der weiteren Betrachtungen. Dazu wird zwischen Ergebnissen mit *günstigem* und *ungünstigem Trennerfolg* unterschieden.

6.2.2 Ausgewählte Versuche mit günstigem Trennerfolg

Günstige Trennerfolge liegen dann vor, wenn die bezogene Massenverteilung m_{BCU} sich nicht bzw. nur wenig mit der bezogenen Massenverteilung m_{BPVC} überlappt.

Das ist z. B. bei den Experimenten E13 und F13 der Fall - die jeweilige Massenverteilung ist in den Bildern 6.2.2.1 und 6.2.2.2 dargestellt.

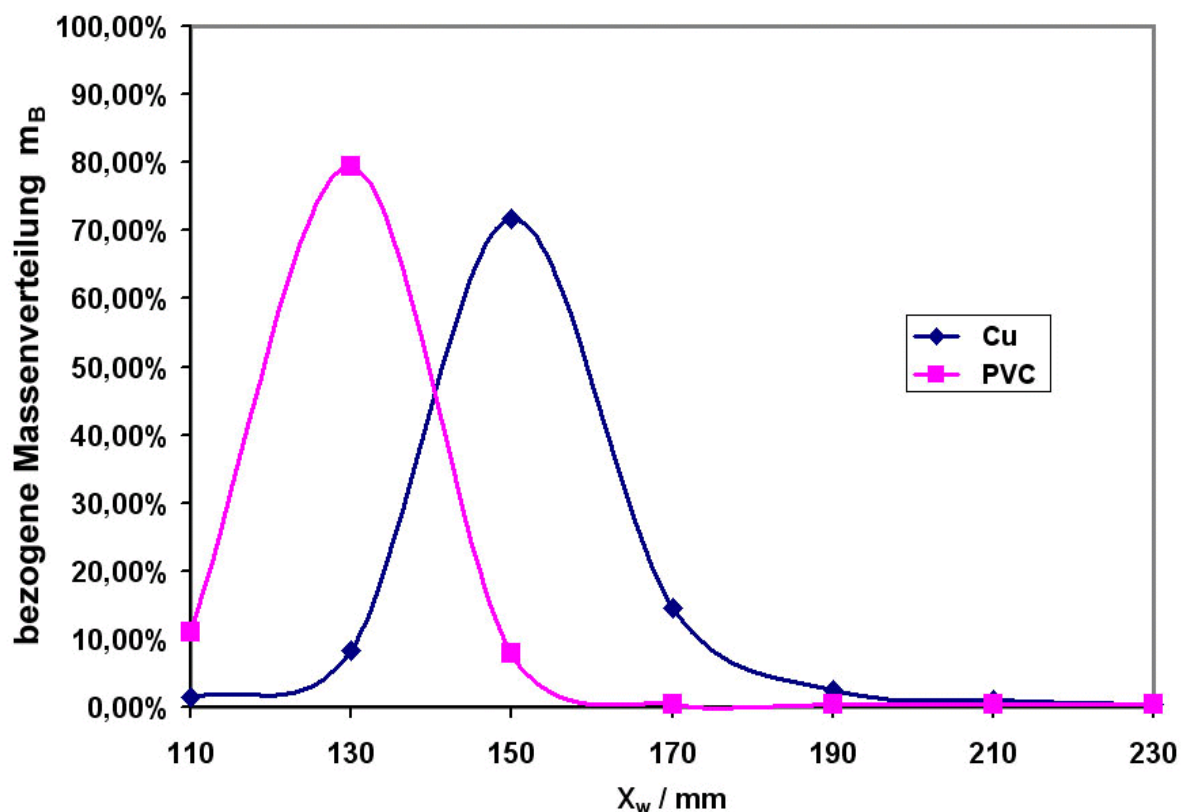


Bild 6.2.2.1

Versuch E13: Massenverteilung für Cu und PVC als Funktion der Wurfweite x_w

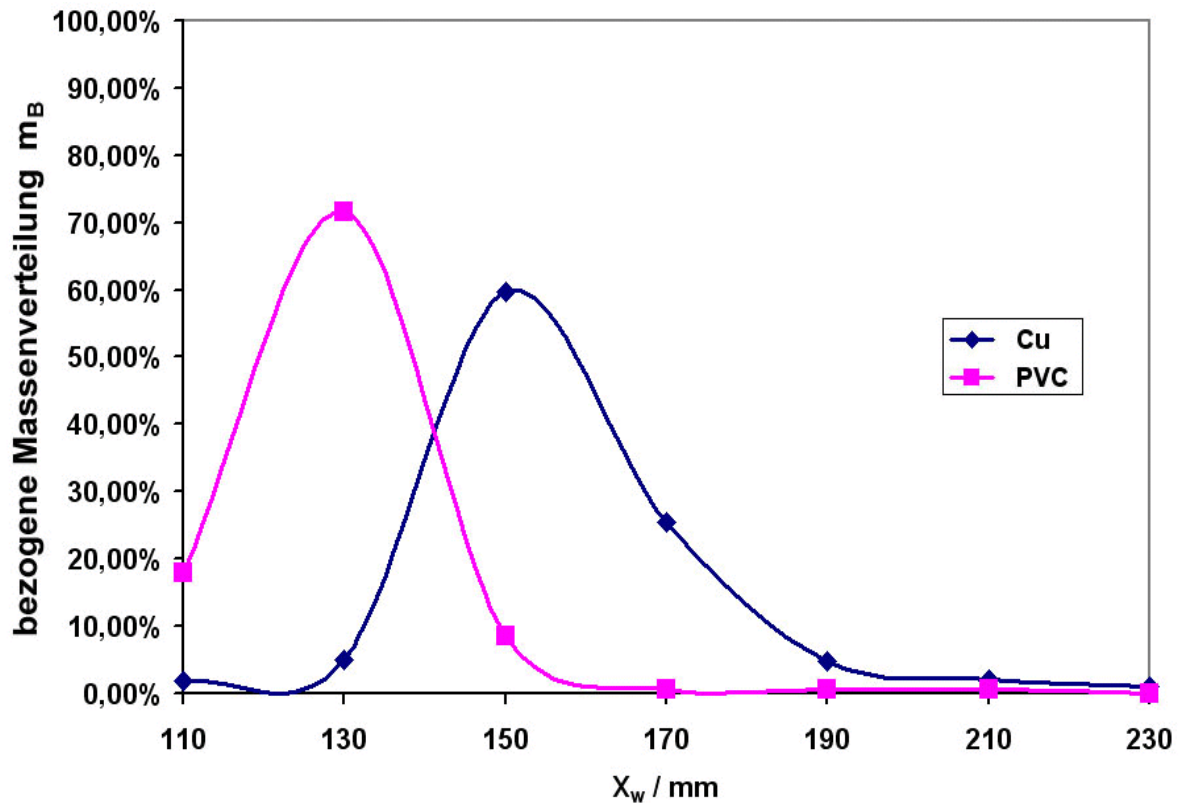


Bild 6.2.2.2

Versuch F13: Massenverteilung von Cu und PVC als Funktion der Wurfweite x_w

Als Trennwurfweite wurde jeweils $x_{WT} = 140 \text{ mm}$ gewählt, d. h. der steile Trennschnitt liegt zwischen den Bechern 7 und 8. Daraus ergeben sich die in Tabelle 6.2.2.1 aufgelisteten Ergebnisse mit *günstigem Trennerfolg*.

Tabelle 6.2.2.1: Auswahl von Versuchen mit günstigem Trennerfolg

Ver- such	Sorten- reinheit $\$/\%$		Abtren- nungsgrad "/%		Trennerfolg $T_E / \%$		Span- nung U / kV	Dreh- zahl n / min^{-1}	Relative Feuchte $n / \%$	Tempe- ratur $h / ^\circ\text{C}$
	$\$_{\text{Cu}}$	$\$_{\text{PVC}}$	" $_{\text{Cu}}$	" $_{\text{PVC}}$	T_{ECu}	T_{EPVC}				
E13	96	79	90	90	87	71	20	20	50	30
F13	97	78	93	90	90	71	20	20	60	30

6.2.3 Ausgewählte Versuche mit ungünstigem Trennerfolg

Ungünstige Trennerfolge sind dann zu erwarten, wenn die bezogene Massenverteilung für Cu sich voll bzw. stark mit der bezogenen Massenverteilung für PVC überlappt. Das ist z. B. bei den Experimenten E42 und F42 der Fall - die jeweilige Massenverteilung ist in den Bildern 6.2.3.1 und 6.2.3.2 dargestellt.

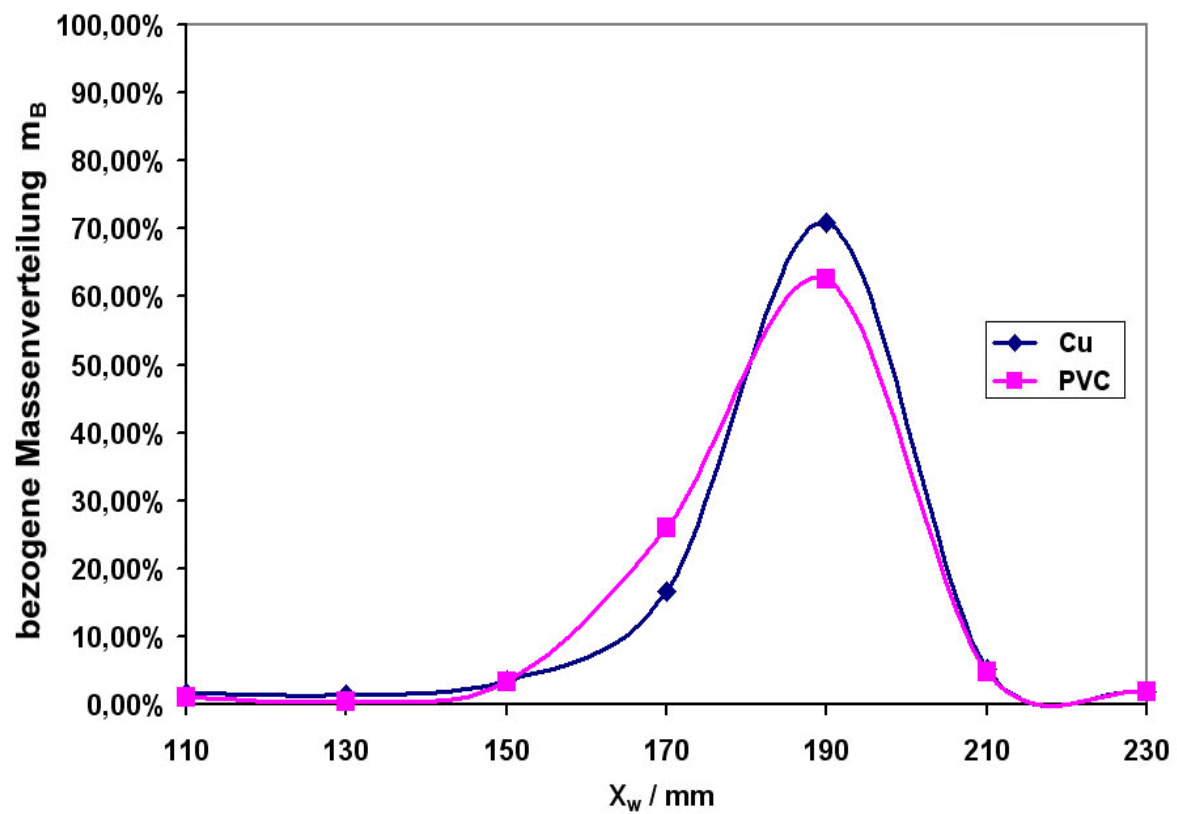


Bild 6.2.3.1

Versuch E42: Massenverteilung für Cu und PVC als Funktion der Wurfweite x_w

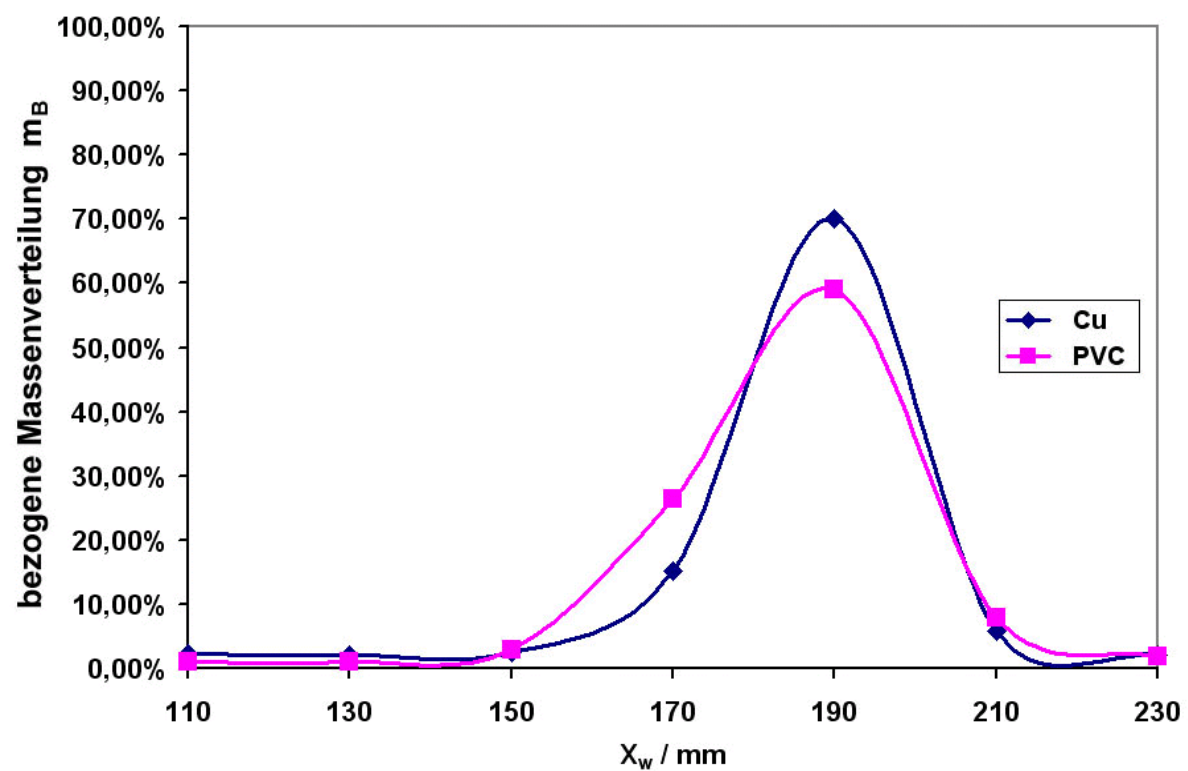


Bild 6.2.3.2

Versuch F42: Massenverteilung für Cu und PVC als Funktion der Wurfweite x_w

Tabelle 6.2.3.1: Auswahl von Versuchen mit ungünstigem Trennerfolg

Ver- such	Sorten- reinheit \$/ %		Abtren- nungsgrad " / %		Trennerfolg T_E / %		Span- nung U / kV	Dreh- zahl n / min ⁻¹	Relative Feuchte n / %	Tempe- ratur h / °C
	\$ _{CU}	\$ _{PVC}	" _{CU}	" _{PVC}	T_{ECU}	T_{EPVC}				
E42	71	15	97	1	69	0	10	150	50	30
F42	71	15	96	2	68	0	10	150	60	30

6.2.4 Trennerfolg in Abhängigkeit von betrieblichen Einflussgrößen

In diesem Abschnitt wird der *Trennerfolg* T_E in Abhängigkeit von den betrieblichen Einflussgrößen

- Walzendrehzahl n
- Elektrodenspannung U
- relativer Feuchte n und
- Temperatur h

für die Versuchsgruppen E und F untersucht. Die Balkendiagramme der nachfolgenden Bilder 6.2.4.1 bis 6.2.4.4 stellen die erzielten Trennerfolge sehr anschaulich dar.

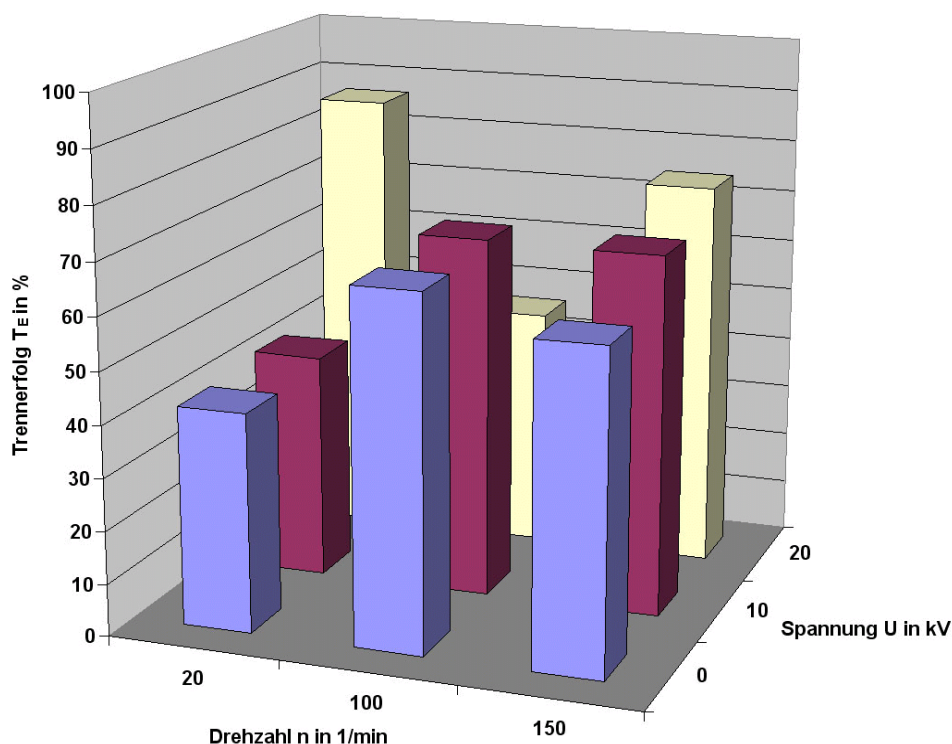


Bild 6.2.4.1

Versuchsgruppe E , Trennerfolg $T_{\text{ECU}} = T_{\text{ECU}}(n, U, n=50\%, h=30^\circ\text{C})$

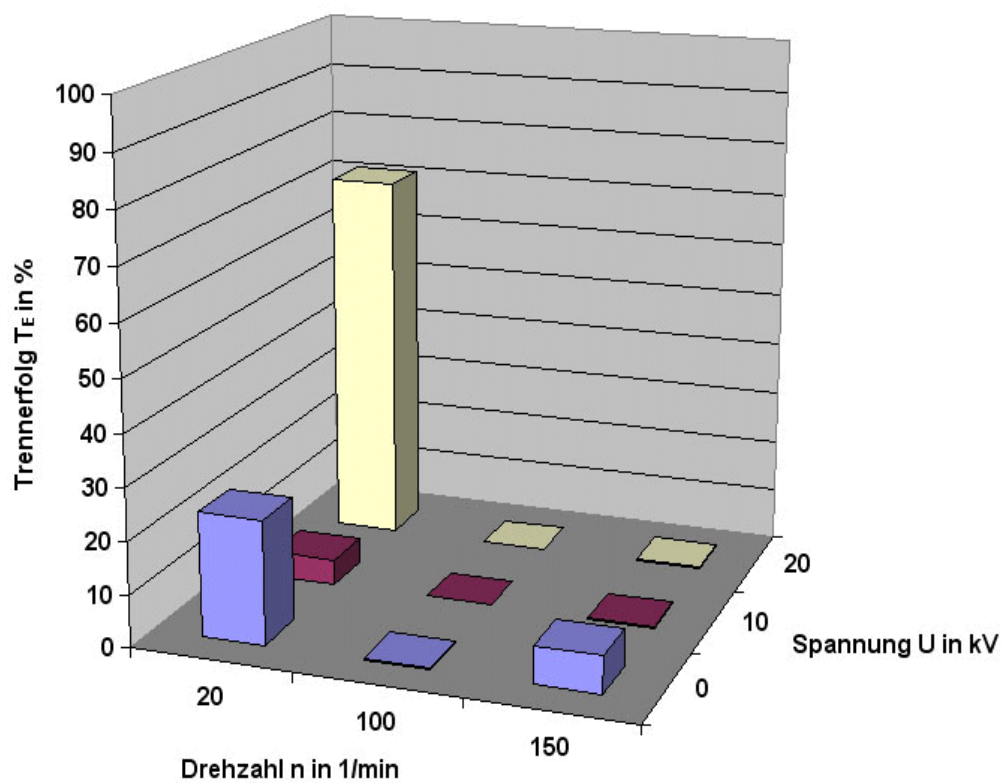


Bild 6.2.4.2

Versuchsguppe E , Trennerfolg $T_{EPVC} = T_{EPVC}(n, U, n = 50 \%, h = 30\text{Å})$

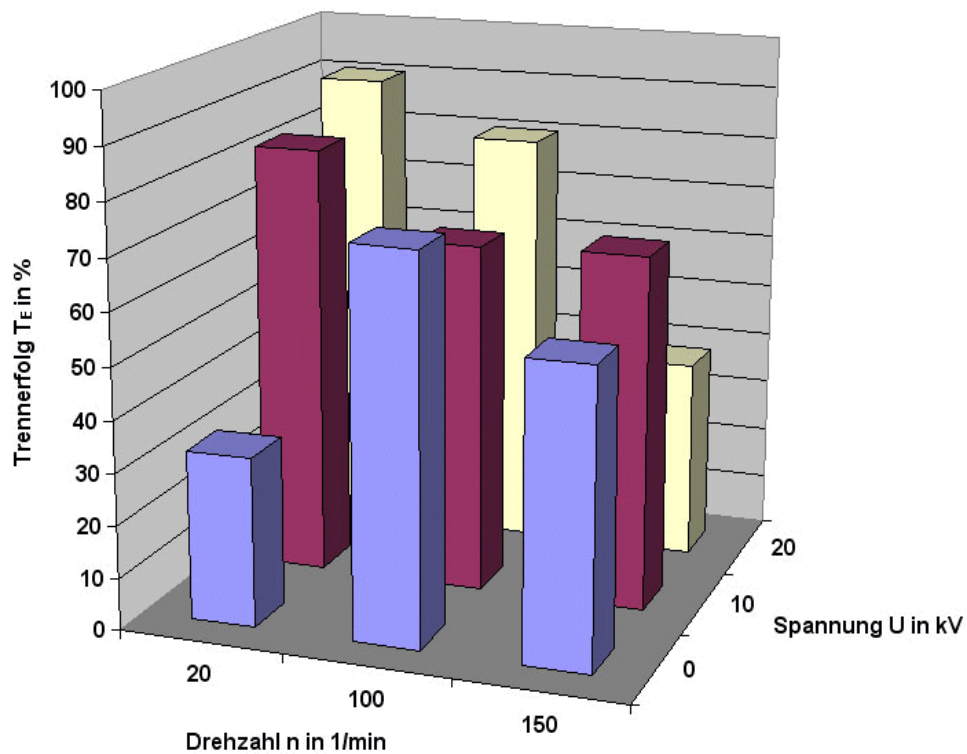


Bild 6.2.4.3

Versuchsguppe F, Trennerfolg $T_{ECU} = T_{ECU}(n, U, n = 60 \%, h = 30\text{Å})$

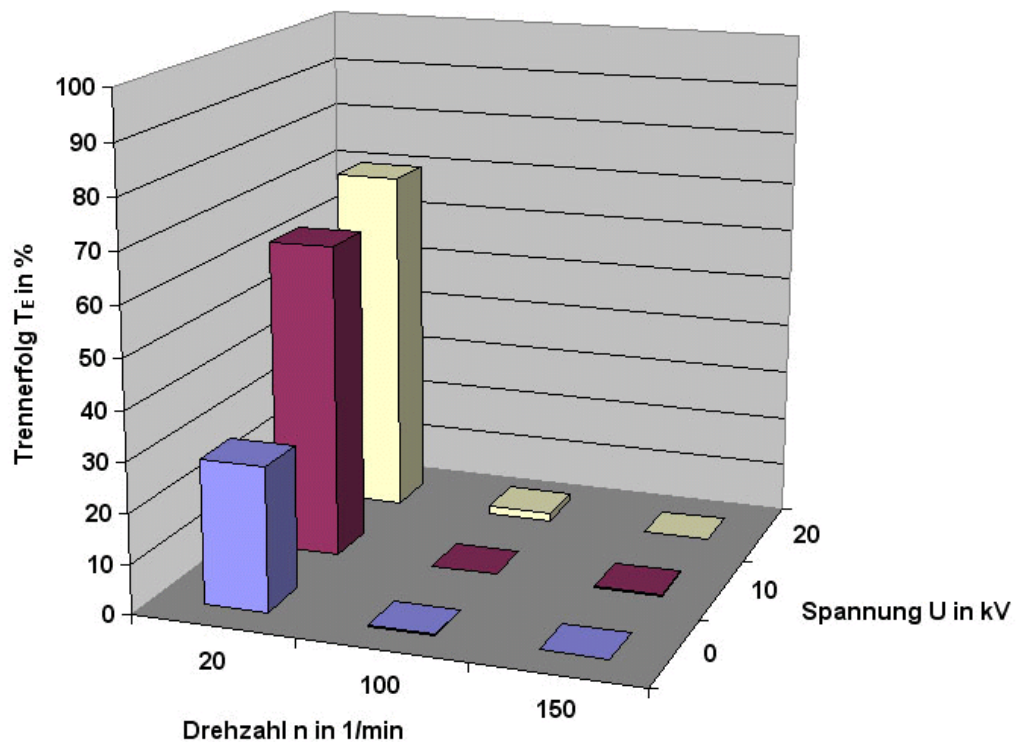


Bild 6.2.4.4
Versuch F, Trennerfolg $T_{EPVC} = T_{EPVC}(n, U, n = 60 \%, h = 30 \mu\text{m})$

Aus den Bildern 6.2.4.1 bis 6.2.4.4 geht hervor, dass gute Trennerfolge bei hoher Elektrodenspannung $U = 20 \text{ kV}$, bei relativen Feuchten n , (40; 60)% und bei niedriger Walzendrehzahl $n = 20 \text{ min}^{-1}$ erzielt wurden.

Nachfolgend sollen die Versuchsergebnisse in Bezug auf den erzielten Trennerfolg näher untersucht werden.

Es ist zu erkennen, dass *ungünstige Trennerfolge* bei niedrigeren Elektrodenspannungen U , (0; 10 kV), relativen Feuchten n , (40; 60%) im Walzendrehzahlbereich n , (20; 150) min^{-1} erzielt wurden.

Günstige Trennerfolge stellten sich bei niedrigen Walzendrehzahlen n ein, dagegen verschlechterten sich die Ergebnisse mit wachsenden Drehzahlen. Dieses Verhalten ist auf den verstärkten Einfluss der Fliehkraft $F_F - n^2$ gegenüber den elektrischen Kräften zurückzuführen. Mit wachsenden Drehzahlen wurden sowohl für Cu als auch für PVC wachsende Wurfweiten x_w erzielt.

Die Elektrodenspannung U beeinflusste den Trennerfolg derart, dass mit wachsender Spannung bessere Trennergebnisse erzielt wurden. Die PVC-Teilchen unterschieden sich bei alleiniger Variation der Spannung kaum in ihrer Wurfweite. Daraus kann auf

eine erhöhte Wirkung elektrischer Kräfte auf die Kupferteilchen bei höheren Elektrodenspannungen geschlossen werden.

Die elektrischen Kräfte sind mit der jeweiligen elektrischen Ladung der Stoffe eng verknüpft. Grundsätzlich ergaben sich bei den Versuchen mit guten Trennergebnissen höhere elektrische Stoffladungen als bei denen mit weniger guten Trennergebnissen. Ein Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit n auf den Trennerfolg T_E war im untersuchten Bereich $n g(40; 60)\%$ für die Stoffpaarung Cu-PVC nicht festzustellen. Ebenso wurde kein Einfluss der Temperatur h im untersuchten Bereich $h g(20; 30) \text{ } ^\circ\text{C}$ festgestellt.

Daraus ist zu schließen, dass die aufwändige Klimatisierung bei diesen Versuchsbedingungen entfallen kann, was sich als großer Vorteil für eine mögliche betriebliche Anwendung des Verfahrens erweist.

7 Berechnung von Flugbahnen mit einem neuen Rechenmodell

Die Versuchsanlage ist so ausgelegt, dass die real auftretenden Teilchenladungen sowohl am Eingang als auch am Ausgang des Trennraumes gemessen werden. Somit sind *Startladung* Q_{P0} und *Endladung* Q_{PB} des Trennprozesses bekannt.

Für den Fall, dass Q_{P0} und Q_{PB} bekannt sind, wurde im Abschnitt 4.1.3 der Ansatz einer Exponentialfunktion als sinnvolle Beschreibung des zeitlichen Ladungsverhaltens $Q_P(t)$ gemacht. Dieser Ansatz erfüllt die Bedingungen, dass

- die Ladung $|Q_P(t)|$ den Grenzwert $|Q_{P\text{MAX}}|$ nicht überschreitet
- etwaige Vorzeichenwechsel der Ladung während der Bewegung im Trennraum Berücksichtigung finden.

Da die elektrische Ladung von Stoffen die entscheidende Einflussgröße für den Trennprozess in Walzenscheidern mit quasielektrostatischen Feld ist, gibt die Ladung Aufschluss über wesentliche Wechselwirkungen während des Teilchenfluges. In Verbindung mit den betrieblichen, den konstruktiven und weiteren stofflichen Einflussgrößen werden die Bahnkurven auf der Basis der theoretischen Betrachtungen des Abschnittes 4.1 numerisch mit dem Fortranprogramm P1 berechnet und mit der „Excel Auswertungsoberfläche“ P2 graphisch dargestellt.

Ergebnisse, die mit dem neuen Modell berechnet wurden, sind beispielhaft für die Versuchsbedingungen der Serie 4 auf den nachfolgenden Seiten angegeben. Auf einer

Seite sind jeweils folgende Diagramme abgebildet:

- die Flugbahn der Teilchen, die in ein Auffangfach fallen und
- die zugehörige Relativgeschwindigkeit \mathbf{v} zwischen Teilchen und Walze.

Oberhalb des Flugbahndiagramms sind ausgewählte Versuchs- und Rechenparameter wie Geschwindigkeit und Durchmesser der Walze, Zeitintervall der Rechenschritte, Dichte und Durchmesser der Teilchen, Teilchenladung der Probe am Trennraumeingang, Abstand, Durchmesser und Winkelstellung der Zylinderelektrode, Elektrodenspannung sowie die Koeffizienten für Haft- und Gleitreibung aufgeführt.

Ausgegeben werden zudem die Zeitkonstante J des Aufladungsvorganges, der Abwurfwinkel φ und die Flugzeit t_f .

Die Betrachtung der Bahnkurven zeigt, dass die Teilchen bei $x = 0$ und $y = R = 90 \text{ mm}$ aufgegeben werden und sich anfangs auf der Walzenoberfläche bewegen, um dann nach dem Abwurf von der Walze in einen Auffangbecher i mit den Koordinaten $x = x_w$ und $y = -200 \text{ mm}$ zu fallen. Die erreichte Wurfweite x_w ist das äußerlich sichtbare Ergebnis des Trennvorganges.

Die zugehörige Relativgeschwindigkeit \mathbf{v} zwischen Teilchen und Walze, die im unteren Diagramm abgebildet ist, macht Vorgänge wie das Beschleunigen, Bremsen, Rutschen und Rollen auf der Walze deutlich. Danach wird ein mit geringer Anfangsgeschwindigkeit aufgegebenes Teilchen auf Walzengeschwindigkeit beschleunigt, um dann nach Wechseln zwischen Rutsch- und Rollbewegungen auf der Walzenoberfläche die Walze zu verlassen. Unter dem Einfluss der Schwerebeschleunigung nehmen dann Teilchen- und auch Relativgeschwindigkeit \mathbf{v} bis zum Auffangen weiter zu.

Alle Diagramme, welche die Relativgeschwindigkeit \mathbf{v} zwischen Teilchen- und Walze wiedergeben, weisen die folgenden drei charakteristischen Bereiche auf:

- Anfangsbereich
(\mathbf{v} ist kleiner als Null und wächst annähernd bis auf den Wert Null an)
- Mittelbereich
(\mathbf{v} schwankt in der Nähe von Null)
- Endbereich
(\mathbf{v} ist in etwa Null und wächst dann bis zum Auffangen bei $x = x_w$).

Das Auffangen bei der Wurfweite $x = x_w$ und dessen Abhängigkeit von Elektrodenspannung U und Walzendrehzahl n wird nun weiter untersucht.

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 20	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -3,36E-13
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodenendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 0	Haftreibungskoeffizient	Gleitreibungskoeffizient 8,91E-01

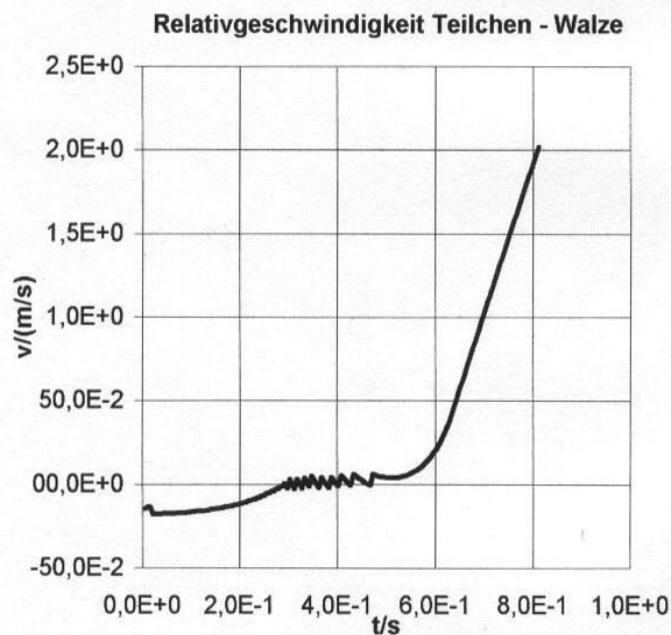
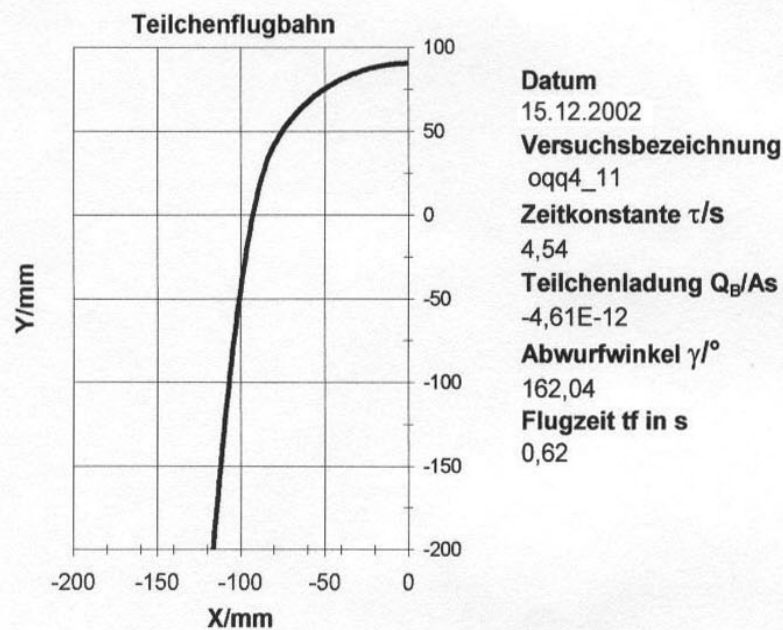
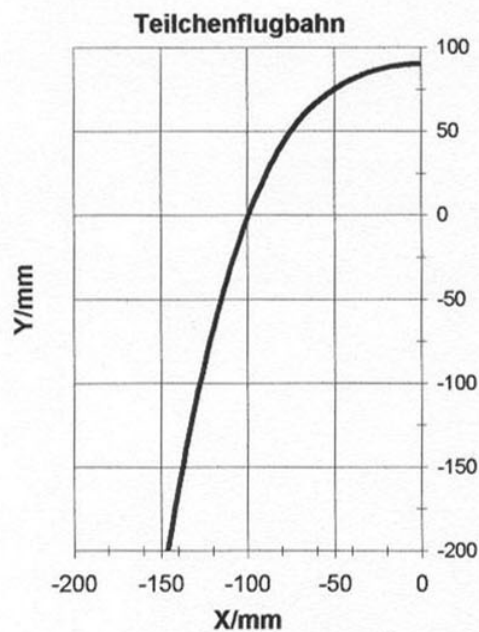


Bild 7.1
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch oqq4_11

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 100	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -3,32E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 0	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,84E-01



Datum
 15.12.2002
Versuchsbezeichnung
 oqq4_12
Zeitkonstante τ /s
 92,09
Teilchenladung Q_p /As
 -2,76E-15
Abwurfwinkel γ /°
 144,00
Flugzeit t_f in s
 0,42

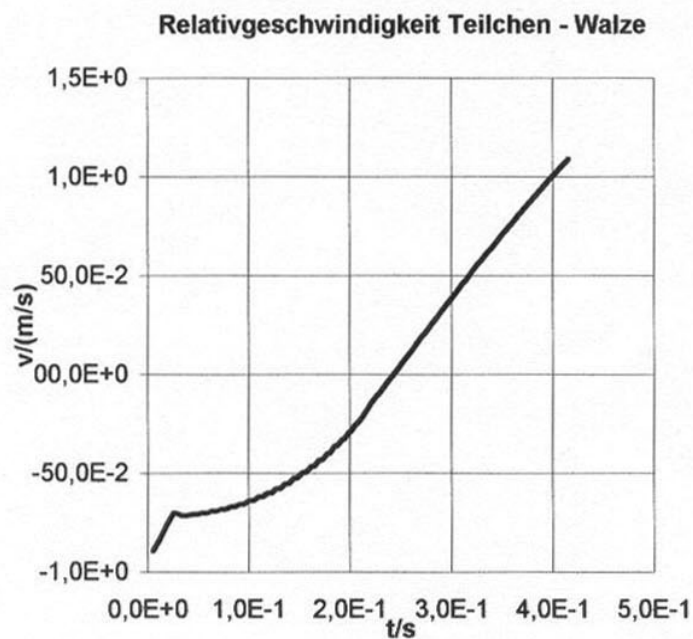
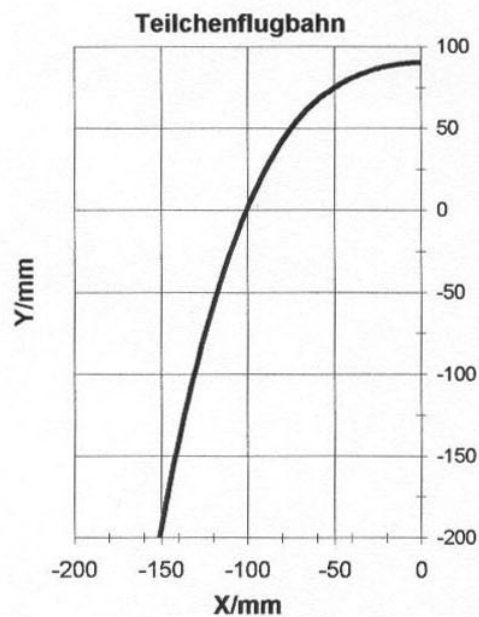


Bild 7.2
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch oqq4_12

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 150	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -2,95E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 0	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,66E-01



Datum
15.12.2002
Versuchsbezeichnung
oqq4_13
Zeitkonstante τ /s
2,36
Teilchenladung Q_B /As
-2,08E-14
Abwurfwinkel γ /°
143,09
Flugzeit t_f in s
0,37

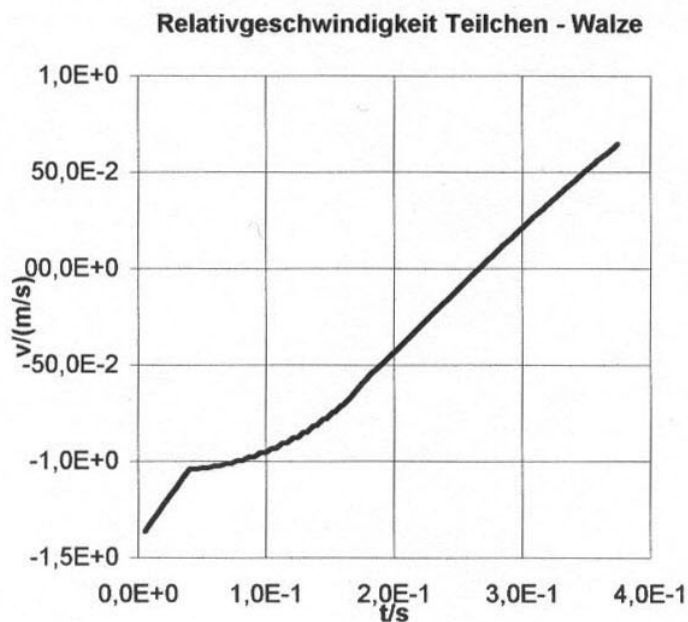


Bild 7.3
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch oqq4_13

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 100	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -1,58E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 10000	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,87E-01

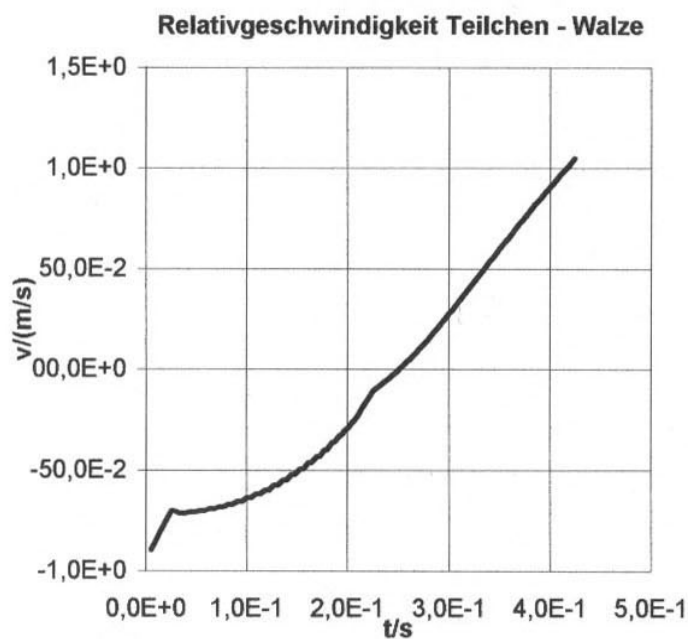
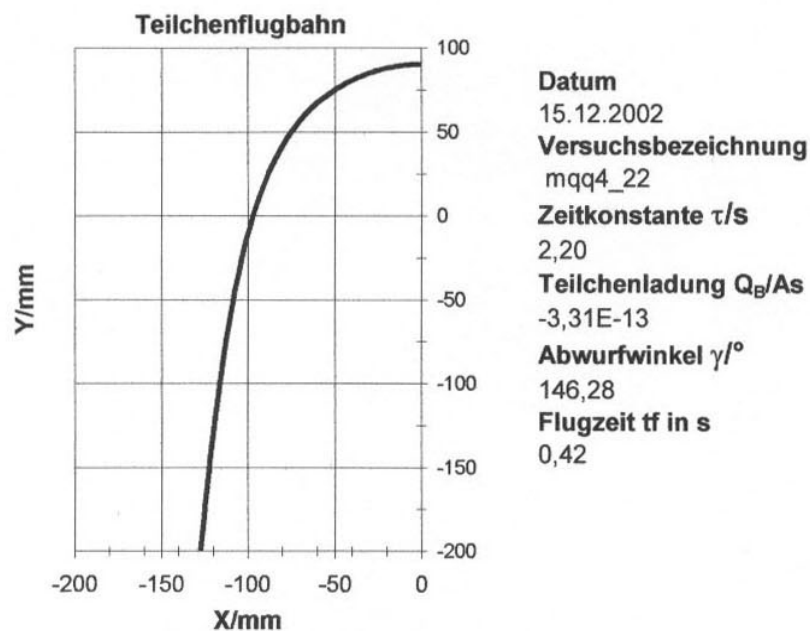
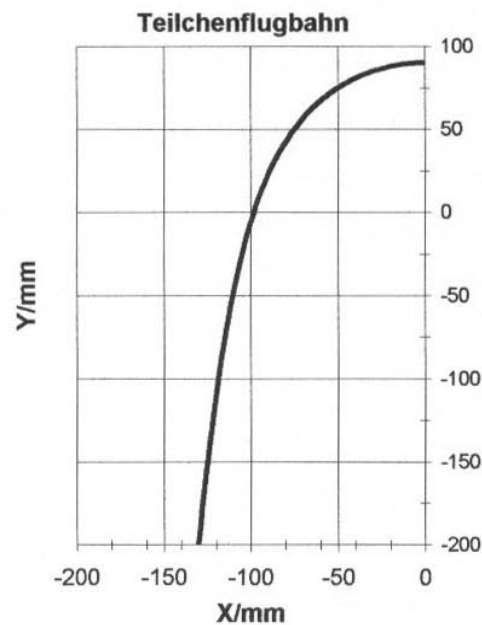


Bild 7.4
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch mqq4_22

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 150	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -3,30E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 10000	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,69E-01



Datum
 15.12.2002
Versuchsbezeichnung
 mqq4_23
Zeitkonstante τ /s
 1,75
Teilchenladung Q_p /As
 -3,20E-13
Abwurfwinkel $\gamma/^\circ$
 142,43
Flugzeit t_f in s
 0,38

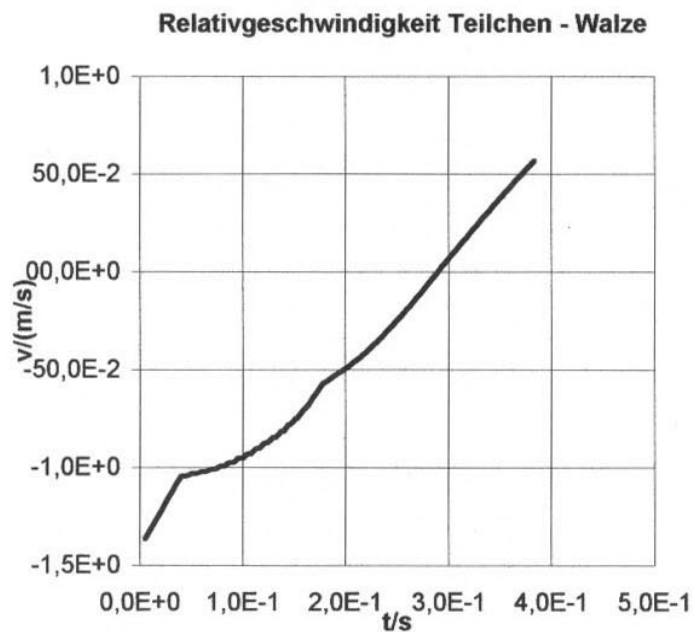


Bild 7.5
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch mqq4_23

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 100	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -3,62E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 20000	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,90E-01

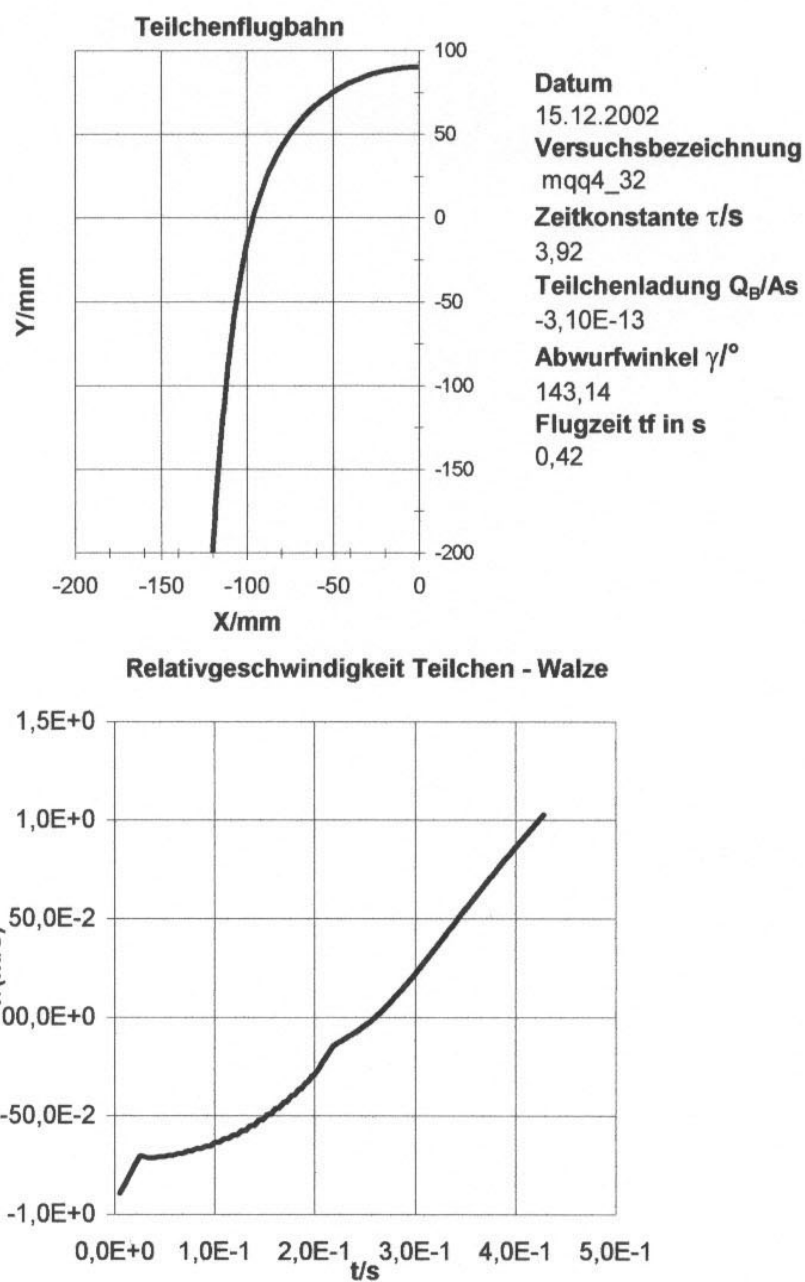


Bild 7.6
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch mqq4_32

Walzengeschwindigkeit [n]=1/min 150	Walzendurchmesser [D]=mm 180	Zeitintervall [dt]=s 5,00E-03
Teilchendichte [rho]=kg/m ³ 2630	Teilchendurchmesser [d _p]=m 2,575E-04	Teilchenladung [Q _p]=As -2,91E-14
Elektrodenabstand [a]=mm 55	Elektrodendurchmesser [d]=mm 30	Elektrodenwinkel [alpha]=grad 153
Spannung [U]=V 20000	Haftreibungskoeffizient 2,00E-03	Gleitreibungskoeffizient 9,70E-01

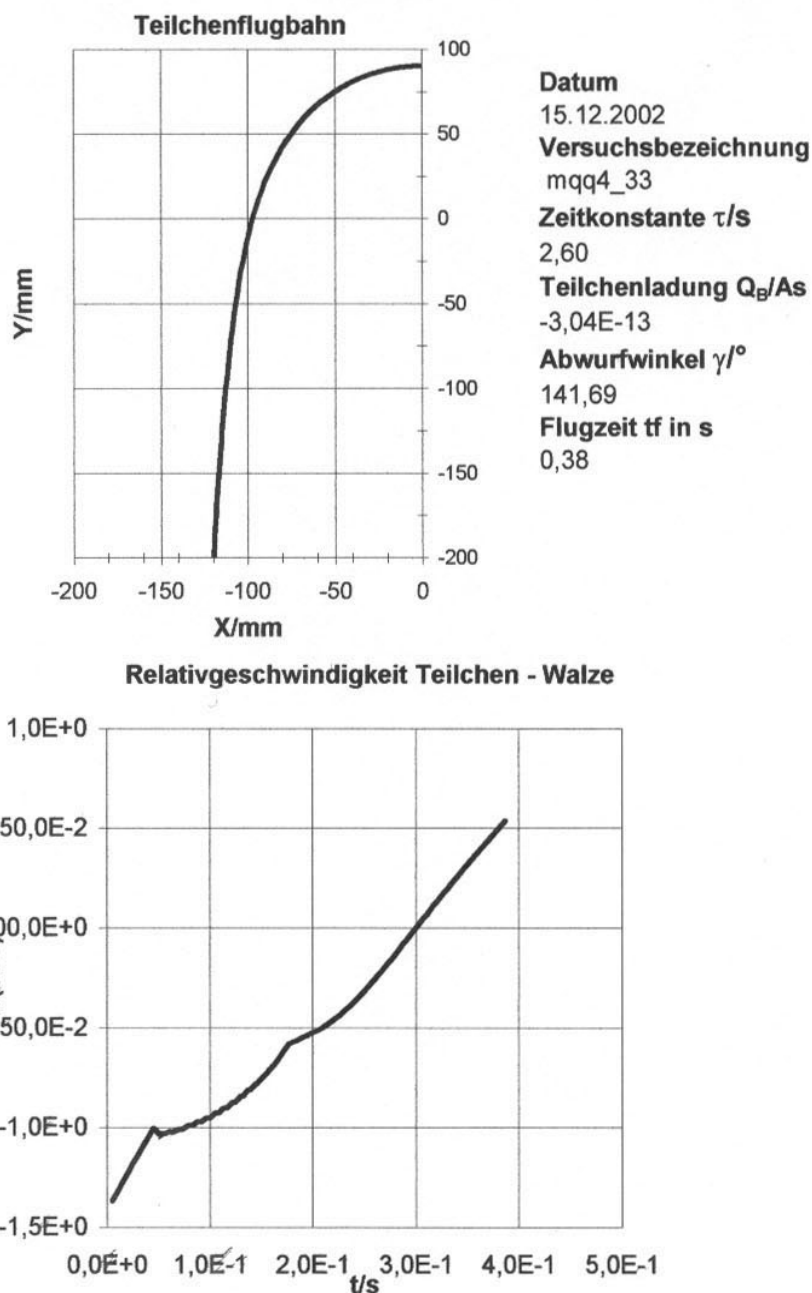


Bild 7.7
Flugbahn und Relativgeschwindigkeit Versuch mqq4_33

Für den Fall, dass die Elektrodenspannung $U = 0$ beträgt, und die Drehzahl n variiert wird, ergeben sich mit zunehmender Drehzahl größere Wurfweiten x_w . Das ist deutlich durch Vergleich der Abbildungen 7.1 bis 7.3 zu erkennen.

Die Anhebung der Elektrodenspannung auf $U = 10 \text{ kV}$ führt bei Drehzahlvariation dazu, dass x_w gegenüber dem vorherigen Fall verkürzt wird. Das ist beim Vergleich der Abbildungen 7.4 bis 7.5 ersichtlich.

Das Anwachsen der Elektrodenspannung auf $U = 20 \text{ kV}$ bewirkt bei wachsender Drehzahl n eine weitere Verkürzung der Wurfweite x_w . Das wird durch den Vergleich der Bilder 7.6 und 7.7 deutlich.

Im anschließenden Abschnitt 8 werden Versuchs- und Rechenergebnisse miteinander verglichen.

8 Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen

Durch den Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen soll die Tauglichkeit des neu entwickelten Rechenmodells geprüft werden.

Der Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen für den Trennvorgang von Quarz im quasielektrostatischen Feld eines Walzenscheiders zeigt, dass die berechneten Wurfweiten x_{wi} sehr gut mit denen der durchgeführten Versuche übereinstimmen. Das gilt sowohl für alle untersuchten Variationen von *Elektrodenspannung* U und *Walzendrehzahl* n , als auch für weitere Parameter wie *Temperatur* h und *relative Luftfeuchte* n .

Dies wird nachfolgend am Beispiel des Versuches oqq4_11 erläutert. Die zugehörigen experimentellen Ergebnisse für das Verhältnis "Ladung/Masse" sind auf Seite 57 dargestellt. Aus den aufgeführten Verhältnissen wird die Anfangsladung Q_{p0} eines Teilchens der Probe und die Endladung Q_{pBi} eines im i -ten Becher aufgefangenen Teilchens bestimmt. Teilchen, die z. B. in den Becher $i = 6$ gefallen sind, haben die Wurfweite x_w **$g(100; 120) \text{ mm}$** erreicht (Zuordnung Bechernummer - Wurfweite siehe Bild 6.1.1 auf Seite 73). Die zugehörige Modellrechnung muss dann für die gewählten Versuchsparameter mit Q_{p0} und Q_{pB6} zur gleichen Wurfweite x_w führen. Mit Bild 7.1 "Teilchenflugbahn" auf Seite 87 wird dieser Zusammenhang bestätigt.

Durch die vorliegende Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Rechenergebnissen wird der gesamte Modellansatz bestätigt. Dies gilt auch für die neuen Ansätze zur Teilchendynamik, die u. a. die Beschreibung des Aufladungsverhaltens mittels einer zeitabhängigen "e - Funktion" und die Behandlung der Reibverhältnisse beinhalten.

Probleme, die andere Autoren [43] in Bezug auf Ladungs- und Reibverhältnisse benannten, sind dadurch erklärt. Die berechneten Abwurfwinkel φ wurden durch eigene Kontrollmessungen bestätigt.

Somit ist gezeigt, dass das neu entwickelte Rechenmodell die tatsächlich auftretenden Vorgänge im Trennraum genau erfasst. Das Programm zur Flugbahnberechnung ist so angelegt, dass die wesentlichen Einflussgrößen berücksichtigt wurden - etwaige Änderungen der stofflichen oder betrieblichen Einflussgrößen sind also schnell vorzunehmen.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die *„Grundlagen zur Trennung von festen, elektrisch geladenen Rohstoffen im quasielektrostatischen Feld eines Walzenscheiders“*.

Über die Trennung von Rohstoffen in elektrischen Feldern unterschiedlicher Scheidertypen haben bereits etliche Autoren berichtet. Die Veröffentlichungen der Autoren Singewald [30, 32, 33], von Szantho [24] und Schautes [43] seien hier stellvertretend genannt.

Das wachsende Interesse an der Entwicklung elektrischer Trennverfahren, mit denen Rohstoffe trocken, umweltfreundlich und kostengünstig getrennt bzw. Wertstoffe recycelt werden können sowie offen gebliebene Fragen bisheriger wissenschaftlicher Untersuchungen führten dazu, eigene, umfassendere und weiterführende Untersuchungen anzustellen. So galt es herauszufinden, welchen Einfluss die Teilchendynamik im Trennraum eines Walzenscheiders mit quasielektrostatischem Feld auf den Trennerfolg hat.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildeten daher *theoretische und experimentelle Untersuchungen*

- zur elektrischen Aufladung von Feststoffteilchen im quasielektrostatischen Feld eines Walzenscheiders und
- die dadurch bedingte Massenverteilung des Austrages

unter definierten *elektromechanischen* und *klimatischen* Bedingungen.

Zuerst wurden die wesentlichen Größen herausgearbeitet, die den Trennprozesses beeinflussen. Die Vielzahl der Einflussgrößen führte zu der Entscheidung, die Trennproblematik mit Hilfe eines Rechenmodells zu behandeln.

Die dazu notwendigen *theoretischen Untersuchungen* erstreckten sich auf die *Entwicklung*

- der Gleichungen zur Berechnung der Kontaktkräfte
- der Gleichungen zur Berechnung der Bewegungsgleichungen
- der Gleichungen zur Berechnung der Feldkräfte
- der Gleichungen zur numerischen Lösung des Problems der Kornbewegung
- des Rechenprogramms zur Flugbahnberechnung
- der Versuchsplanung
- der Versuchsanlage

und auf

- die Berechnung der Flugbahnen sowie
- die Auswertung der theoretischen Ergebnisse.

Die *experimentellen Untersuchungen* erstreckten sich auf

- den Bau, die Prüfung und den Betrieb der Versuchsanlage
- die Durchführung des Versuchsprogramms
- die Aufnahme und Verarbeitung der Versuchsdaten sowie
- die Auswertung der Versuchsergebnisse.

Die elektromechanischen Bedingungen wurden experimentell in zwei grundsätzlichen Schritten mit Hilfe eines Separationsansatzes untersucht.

Der erste Schritt behandelte die Bewegung körniger Feststoffe im Trennraum unter dem alleinigen Einfluss der mechanischen Kräfte, also ohne externes elektrisches Feld, bei Variation der Walzendrehzahl n . Zwischen den Elektroden des Walzenscheiders lag keine elektrische Spannung U an.

Im zweiten Schritt wurde das Zusammenwirken von mechanischen und elektrischen Kräften, also mit externem elektrischen Feld, bei Variation der Walzendrehzahl n untersucht. Zwischen den Elektroden des Walzenscheiders lag nun eine hohe veränderbare elektrische Gleichspannung U an.

Die Einflussgrößen Temperatur θ und relative Luftfeuchtigkeit ϕ wurden variiert.

Die stofflichen Einflüsse auf das Trennverhalten im quasielektrostatischen Feld eines Walzenscheiders wurden beispielhaft untersucht für:

- einen homogenen Vergleichsstoff und
- ein Stoffgemisch.

Als homogener Vergleichsstoff wurde Quarzsand und als Stoffgemisch Leitungsschrott gewählt. Der Leitungsschrott entstand durch Zerkleinerung ausgedienter isolierter elektrischer Kupferleitungen, welche die Automobilindustrie in der KFZ-Produktion eingesetzt hatte. Der Schrott setzte sich aus den Wertstoffen Kupfer (Cu) und Polyvinylchlorid (PVC) zusammen. Das gewählte Beispiel der möglichst sortenreinen Wertstoffrückgewinnung von Cu und PVC hat daher besondere praktische Bedeutung für die Umwelttechnik, d. h. für das Recyceln von Wertstoffen.

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst:

- *Der Austrag des Vergleichsstoffes Quarz verschob sich ohne externes elektrisches Feld mit zunehmender Drehzahl n zu größeren Abständen x_w von der Walze. Das war auf den vermehrten Einfluss der zu n^2 - proportionalen Fliehkraft zurückzuführen. Zudem wurden die Teilchen nach ihrer Korngröße bzw. Masse getrennt und somit klassiert*
- *Mit quasielektrostatischem Feld verkürzte sich unter sonst gleichen Bedingungen der Abstand des negativ geladenen Austrags von der Walze. Hierbei zeigte sich deutlich die Wirkung der erzielten elektrostatischen Aufladung*
- *In den Versuchen zum Recyceln von Leitungsschrott, dem Stoffgemisch aus Kupfer (Cu) und Polyvinylchlorid (PVC), war ohne externes elektrisches Feld keine wesentliche Trennung des Gemisches festzustellen. Dagegen wurde in den Versuchen im quasielektrostatischen Feld mit zunehmender elektrischer Spannung eine schon mit dem Augenschein wahrnehmbare saubere Trennung der Wertstoffe Cu und PVC erzielt. Zur objektiven Bewertung der Trennergebnisse wurden die Kennzahlen Sortenreinheit, Abtrennungsgrad und Trennerfolg eingeführt*
- *Kupfer, mit einer Dichte von $8,96 \text{ kg/dm}^3$, wurde erwartungsgemäß im größeren Abstand von der Walze ausgetragen als PVC mit einer Dichte von $1,38 \text{ kg/dm}^3$. Das ist durch die größere Dichte ρ_{Cu} bzw. die größere Masse m_{Cu} des Kupfers zu erklären. Infolge der höheren elektrischen Leitfähigkeit des Kupfers bzw. der Kupferoberfläche gegenüber PVC wurden Ladungsanteile schneller über die Trommeloberfläche zur Erde abgeleitet. Auch bei diesen Versuchen trat, wie vorher schon beim Quarzsand, ein Klassiereffekt*

auf. Feines Korn wurde näher an der Trommel ausgetragen als grobes Korn

- Sowohl für die Temperatur ***h*** als auch für die relative Luftfeuchtigkeit ***n*** ergaben sich in den untersuchten Bereichen ***h***, (20; 30) ***h*** und ***n***, (40; 60) % keine messbaren Einflüsse. D. h., der Verfahrensschritt „Klimatisierung des Versuchsgutes“ vor und während des Trennprozesses kann zukünftig entfallen
- Die im Laboratoriumsmaßstab durchgeführten Versuche lassen darauf hoffen, dass die Ergebnisse unter ähnlichen Bedingungen auf halbertechnische Versuche erfolgreich übertragen werden können. Unter Vernachlässigung der klimatischen Einflussgrößen Temperatur ***h*** und relative Luftfeuchtigkeit ***n*** sind Drehzahl ***n*** und elektrische Spannung ***U*** die wichtigsten untersuchten betrieblichen Einflussgrößen zum Erreichen guter Trennerfolge.

Die Ergebnisse der Experimente zeigten gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Rechnungen, die mit Hilfe eines neu entwickelten Rechenmodells durchgeführt wurden. Das Rechenmodell berücksichtigte neben den relevanten mechanischen Einflussgrößen auch die elektrischen Einflussgrößen, wie z. B. die ortsabhängige elektrische Feldstärke und eine zeitabhängige elektrische Teilchenaufladung während der Teilchenbewegung durch den Trennraum.

Mit der hier entwickelten Teilchenbewegung sind umfassendere Aussagen zum Trennverhalten von Stoffen in quasielektrostatischen Feldern von Walzenscheidern als bisher möglich. Davon zeugte das Bewegungsverhalten der Teilchen, die zwischen Aufgabe und Auffangen drei Geschwindigkeitsbereiche nacheinander durchliefen. Nach einer ersten Beschleunigungsphase der Teilchen traten Rutsch- und Rollbewegungen auf, die dann nach einer zweiten Beschleunigungsphase mit dem Auffangen endete. Die berechneten Abwurfwinkel ***α*** wurden durch eigene Kontrollmessungen bestätigt. Auch die Tatsache, dass elektrische Umladungen von Teilchen im Trennraum erfolgten, wird nun durch das Modell korrekt beschrieben.

10 Schrifttumsverzeichnis

[1] Johnson, H.B.

Electric Separation I,
Engineering and Mining Journal, Nr. 9, Vol. 139, Sept. 1938, S. 37-43
Electric Separation II,
Engineering and Mining Journal, Nr. 10, Vol. 139, Sept. 1938, S. 42-43
Electric Separation III,
Engineering and Mining Journal, Nr. 12, Vol. 139, Dez. 1938, S. 41-45

[2] Le Baron, I.M.; Knopf, W.C.

Application of Electrostatics to Potash Benefication
Mining Engineering 10, Nr.10, 1958, S.1081-1083

[3] Delon, J.-F.

Théorie de la Séparation Électrostatique à l'aide de l'effet corona
Annales Des Mines, Paris, 1966, S. 37-50

[4] Cross, J.

Electrostatics: Principles, Problems and Applications
Adam Hilger,
Bristol and Philadelphia, 1987

[5] Ladenburg, R.

Untersuchungen bei der sogenannten elektrischen Gasreinigung
Annalen der Physik, 5. Folge, Bd.4, 1930, S. 863-897

[6] Pauthenier, M. M.; Moreau-Hanot, M.

La charge des particules spheriques dans un champ ionise
Journal de Physik 17, 1932, S. 590-613

[7] Pauthenier, M. M.

La theorie de la charge electrique des poussieres
Rev. gen. Electr. 45, 1939, S. 583-595

- [8] Mora, R.G.
Study of Electrical Concentration of Minerals
Thesis, Mass. Inst. Technol. (USA), 1958
- [9] Mukai, S.
Untersuchung über elektrostatische Anreicherung von Kohlen geringen Asche-
gehaltes im Koronafeld
Freiberger Forschungshefte A 326, 1964
- [10] Zimon, A.
Adhesion of Dust and Powder
Consultants Bureau, New York, 1982
- [11] Schumann, W.
Untersuchungen zur Aufladung fester Körper
Plaste und Kautschuk, 10. Jahrgang, Heft 9, 1963, S. 526-531
Plaste und Kautschuk, 10. Jahrgang, Heft 10, 1963, S.590-593
Plaste und Kautschuk, 10. Jahrgang, Heft 11, 1963, S.654-660
- [12] Schubert, H.
Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band I und II
VEB Verlag der Grundstoffindustrie,
Leipzig, 1986
- [13] Olofinskii, N.F.; Novikova, V.A.; Belov, V.I.
Application of electrical methods of separation to close sizing of finely
dispersed mineral particles
Tenth International Mineral Processing Congress 1973
Institution of Mining and Metallurgy, London
- [14] Winkler, E.; Schubert, G.; Mosch, E.; Schubert, H.
Aufbereitung von plast- und gummiisolierten Kabelschrotten mittels Elektro-
sortierung
Neue Hütte 19, 1974, S.452-460

[15] Hildenbrand, H.; von Szantho, E.

Untersuchungen über die elektrische Leitfähigkeit von Mineralien und deren
Ablenkung am Elektro-Walzenabscheider
Aufbereitungstechnik, Nr. 11, 1965, S. 637-645

[16] Hildenbrand, H.

Aufbereitungstechnische Studie über den Zusammenhang zwischen der
elektrischen Leitfähigkeit und der Ablenkung verschiedener Minerale an einem
Walzenabscheider
Dissertation, TU Berlin, 1965

[17] Schnitzler, H.

Untersuchung des Walzenscheiders sowie ein Verfahren zur Messung des
elektrischen Widerstandes von Staub und zur Bestimmung des Kornüber-
gangswiderstandes
Bergbau-Archiv, Band 11/12, 1950, S. 138-154

[18] Schnitzler, H.

Beitrag zur elektrostatischen Kohleaufbereitung
Bergbau-Archiv, Jahrg. 18, Heft 2, 1957, S.41-46

[19] Cakir, J.; Rozelaar, A.J.W.; Wells, I.S.

A Preliminary Analysis of the Mechanical Forces Acting on Particle on the
Rotor of an Electrical Separator
Special Publikation Vol.I
XIIth. International Mineral Processing Congress, 1977
Sao Paulo, Brazil

[20] Meinander, T.

Zur Theorie der Starkfeld-Elektroscheidung
Aufbereitungstechnik, Nr. 3, 1977, S. 127-133

[21] Linari - Linholm, A.A.

Elektrostatisches Trennen von Diamanten mit schwerem Begleitmaterial
Aufbereitungstechnik, Nr. 8, 1964, S. 447-451

- [22] Lurgi GmbH
Elektrosortierung System Lurgi
Lurgi Schnellinformation H 1518/12.84
- [23] Stieler, A.
Sortierung von mineralischen Rohstoffen im elektrischen Feld
Aufbereitungstechnik, Nr. 11, 1960, S. 474-480
- [24] Von Szantho, E.
Elektrostatistische Aufbereitung in der Industrie der Steine und Erden
Tonindustrie-Zeitung und Keramische Rundschau, Heft 5/6,
1953, S. 83-88
- [25] Kirchberg, H.
Elektrische Aufbereitung
Bergakademie, 15. Jahrg., Heft 7, Juli 1963, S. 506-51
- [26] Moore, A. D.
Electrostatics and its Applications
John Wiley & Sons
New York, London, Sydney, Toronto, 1973
- [27] Olofinskii, N. F.
Electric-corona separation of coal fines and certain minerals
Israel Program for Scientific Translation
Jerusalem 1969
- [28] Monostory, F.P.; Pickardt, W.; Simonis, W.; V. Szantho, E.
Das Abscheiden von Pyrit aus Kohlenstaub im elektrischen und magnetischen Feld
1. Teil: Aufbereitungstechnik, Nr. 4, 1970, S. 207-220
2. Teil: Aufbereitungstechnik, Nr.10, 1970, S. 599-614

- [29] Dascalescu, L.; Morara, R.; Iuga, Al.; Neamtu, V.
Corona-electrostatic separation processes for recovery of conducting and insulating materials from industrial wastes
Proceedings of international Conference on Modern Electrostatics, S.203-206, Beijing, China, 1988
Pergamon Press, Oxford, New-York, Beijing, Frankfurt, Sao Paulo, Sydney, Tokyo, Toronto
- [30] Singewald, A.; Fricke, G.
Die elektrostatische Aufbereitung von Kali-Rohsalzen
Chemie Ingenieur Technik 55, Nr.1, 1983, S. 39-45
- [31] Northcott, E.; Le Baron, I.M.
Application of Electrostatics to Feldspar Benefication
Mining Engineering 10, Nr.10, 1958, S.1087-1093
- [32] Singewald, A.
Elektrostatik -neue umweltfreundliche Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumrohstoffen
Erzmetall 33, Nr. 1, 1980, S. 19-27
- [33] Singewald, A.
Sortieren von Mineralsalzen nach spezifischen Eigenschaften
Chemie Ingenieur Technik 62, Nr.3, 1990, S. 191-196
- [34] Singewald, A., Fricke, G.
Minerale im Hochspannungsfeld
Umschau 81, 1981, S. 272-275
- [35] Niermöller, F.
Ladungsverteilung in Mineralgemischen und elektrostatische Sortierung nach Triboaufladung
Dissertation, TU Clausthal, 1988

- [36] Inculet, I. I.
Electrostatic Mineral Separation
John Wiley & Sons Inc.
New York, Brisbane, Chichester, Toronto, Singapore, 1984
- [37] Keithley
Static Charges in Electronics Manufacturing
Application Note 290
Keithley Instruments, Inc. 1984
- [38] Keithley
Low Level Measurements
Keithley Instruments, Inc. 1984
- [39] Ralston, O. C.
Electrostatic separation of mixed granular solids
Elsevier Publishing Company
Amsterdam, London, New York, Princeton, 1961
- [40] Kirchberg, H.
Ein Beitrag zum quantitativen Verständnis der Scheidung inelektrostatischen Feldern
VIII. Internationaler Kongress für Erzaufbereitung 1968, Leningrad
- [41] Schickel, Alfred
Scheiden von körnigem Material im elektrostatischen Feld einer Gitter- Platte-
Anordnung
Dissertation, Akademie der Wissenschaften Berlin, 1967
- [42] Kirchberg, H.; Schickel, A.
Ein Beitrag zum quantitativen Verständnis der Scheidung in elektrostatischen
Feldern
VIII. Internationaler Kongress für Erzaufbereitung Leningrad 1968

- [43] Schautes, W.
Grundlagenuntersuchungen über die Wirkung elektrischer und mechanischer
Einflussgrößen bei der Trennung nichtleitender Feststoffe in elektrostatischen
Feldern
Dissertation, RWTH Aachen, 1980
- [44] Binns, K.J.; Lawrenson, P.J.
Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems
Pergamon Press,
Oxford, New York, 1973
- [45] Prinz, H.
Hochspannungsfelder
R. Oldenbourg Verlag,
München, Wien, 1969
- [46] Philippow, E.
Grundlagen der Elektrotechnik
Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG,
Leipzig, 1976
- [47] Wolff, I.
Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie I
Bibliographisches Institut,
Mannheim, Wien, Zürich, 1967
- [48] DIN VDE 0432 Teil 1/8.1991
VDE-Verlag, Berlin
- [49] Lorenz, M.
Sortierung von Leitungsschrott im quasielektrostatischen Feld eines
Walzenscheiders
Studienarbeit, Universität GH Essen, 1993

[50] Kakovsky, I. A.; Revnivzev, V. L.

Effects of Surface Conditioning on the Electrostatic Separation of Minerals of Low Conductivity, International Mineral Processing Congress, London 1960
The Institut of Mineral and Metallurgy, S. 775-786

[51] Hamos GmbH

Elektrostatistische Separatoren zur Metall-Kunststoff-Trennung
Internet-Version 2003; Adresse: <http://www.hamos.com>

[52] Dyckhoff, H.

Vorlesung "Produktions- und Logistik-Controlling"
RWTH Aachen, Institut für Wirtschaftswissenschaften, SS 2002

[53] Souren, R.

Vorlesung "Abbildung komplexer Produktionsnetze: Das Beispiel des Verpackungskreislaufs", Seite StP 8/34
RWTH Aachen, Institut für Wirtschaftswissenschaften, SS 2002

[54] Souren, R.

Stoffstromanalyse komplexer Kreislaufsysteme: Darstellung eines hierarchischen Modellierungsansatzes am Beispiel des Verpackungskreislaufes
RWTH Aachen, Institut für Wirtschaftswissenschaften
Arbeitsbericht Nr. 03/01, Januar 2003